

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID  
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

INGENIERÍA TÉCNICA DE TELECOMUNICACIONES  
SISTEMAS DE COMUNICACIONES



PROYECTO FIN DE CARRERA

# ANÁLISIS ESPECTRAL DEL TIMBRE DE LA TROMPA

Autora: GLORIA HIJOSA MARTÍN

Tutora: ASCENSIÓN GALLARDO ANTOLÍN

Julio 2015



# Agradecimientos

En primer lugar me gustaría agradecer a mi familia, mis padres y mis hermanos, porque sin su apoyo y paciencia, aunque sea desde muchos kilómetros de distancia, no hubiera llegado hasta aquí. Han sido muchos años de esfuerzo, sin estar casi nunca en casa, de la universidad al conservatorio, del conservatorio a la universidad y así todos los días... Han tenido que aguantar muchos de mis malos humos (todavía los aguantan...) y muchas tardes de darles la “serenata” con la trompa (aquí también debería incluir a mis vecinos...). GRACIAS!!!

A todas mis amigas de Madrid, en especial a Edurne, Teresa, Marta, Isa y Rosana, que pase el tiempo que pase sin vernos siempre hay tema para “marujear”. GRACIAS!!!

A mi “gran familia alemana” de Kiel, que hacen que no me sienta sola a miles de kilómetros de casa. GRACIAS!!!

A mi tutora Ascen, que gracias a su infinita comprensión, paciencia y ayuda, he conseguido llegar a terminar este proyecto fin de carrera. GRACIAS!!!

A mis compañeros “tromperos” del Real Conservatorio Superior de Música de Madrid por dejarme utilizar sus trompas para este proyecto, que sé que es difícil “despegar” a un músico de su instrumento. GRACIAS!!!

Y por último, en especial y con todo mi cariño a David, que aunque ya no esté a mi lado, siempre lo tengo presente... Por ser mi compañero de viaje durante tantos años, compartiendo muy buenos momentos y unos cuantos malos, pero sobre todo, por siempre estar a mi lado ayudándome y apoyándome hasta el final. MUCHAS GRACIAS!!!



“No basta con oír la música; además hay que verla”

*Igor Stravinsky (1882-1971)*



# Resumen

En este proyecto se estudia el timbre de la trompa mediante el análisis espectral de su señal acústica con el objetivo de poder comparar trompas de diferentes marcas, modelos y materiales de fabricación en función del color de su timbre.

Para ello, se ha creado una base datos de 54 grabaciones del registro sonoro correspondiente a nueve trompas dobles, las cuales se han digitalizado para, posteriormente, realizar su análisis espectral utilizando dos técnicas de procesamiento de señales de audio: La Transformada de Fourier Localizada (STFT) y un método de extracción de armónicos. Tras el análisis espectral se han clasificado las trompas en función de la distribución de la energía de su correspondiente señal acústica a lo largo de su serie armónica.

Las conclusiones de los resultados del análisis espectral se han obtenido de acuerdo a los conceptos sobre el timbre desde el punto de vista de un trompista experto.

---



# Abstract

In this project, the French Horn Timbre is studied by means of the spectral analysis of audio signals with the aim of comparing different brands, models and fabrication materials according to their characteristic timbre color.

To that end, a database of 54 recordings of audio registers for nine double French Horn has been created. These recordings have been digitized to perform afterwards their spectral analysis using two audio signal processing techniques: Short Time Fourier Transform (STFT) and a harmonic extraction method. After the spectral analysis is carried out, the different French Horn models have been classified with regard to the energy distribution of their corresponding acoustic signals along their harmonic series.

The conclusions drawn from the spectral analysis results have been obtained in accordance to the concepts on Timbre from the view of an expert in French Horn.



# Índice general

<b>1. Introducción</b>	<b>21</b>
1.1. Motivación . . . . .	21
1.2. Objetivo . . . . .	22
1.3. Estructura de la memoria . . . . .	22
<b>2. La Trompa</b>	<b>25</b>
2.1. Introducción . . . . .	25
2.2. Historia . . . . .	25
2.2.1. Un instrumento práctico . . . . .	26
2.2.2. La trompa de caza se incorpora a la orquesta . . . . .	27
2.2.3. Primeras mejoras técnicas . . . . .	28
2.3. Características Técnicas de la Trompa . . . . .	30
2.3.1. Características Técnicas . . . . .	31
<b>3. Características Acústicas de la Trompa</b>	<b>35</b>
3.1. Introducción . . . . .	35
3.1.1. Cualidades del Sonido . . . . .	36
3.2. El Timbre . . . . .	37
3.2.1. Tonos Puros y Tonos Complejos . . . . .	38
3.2.2. Profundización sobre el concepto de Timbre . . . . .	42
3.3. Estructura Armónica de la Trompa . . . . .	44
3.4. Timbre de la Trompa . . . . .	47

3.4.1. Materiales . . . . .	48
3.4.2. La Boquilla . . . . .	50
3.4.3. La Campana . . . . .	51
<b>4. Análisis Espectral del Timbre de la Trompa</b>	<b>53</b>
4.1. Introducción . . . . .	53
4.2. Transformada de Fourier Localizada (STFT) . . . . .	55
4.2.1. Introducción . . . . .	55
4.2.2. El Espectrograma . . . . .	57
4.2.3. Aplicación de la STFT en el estudio del timbre de la trompa . . . . .	59
4.3. Cálculo de Armónicos ( <i>Timbre Toolbox</i> ) . . . . .	62
4.3.1. Introducción . . . . .	62
4.3.2. Parciales armónicos sinusoidales (Armónicos) . . . . .	63
4.3.3. Aplicación de la <i>Timbre Toolbox</i> en el estudio del timbre de la trompa . . . . .	64
4.4. Análisis Espectral . . . . .	66
4.4.1. <u>Fa3</u> . . . . .	67
4.4.2. <u>Sol3</u> . . . . .	74
4.4.3. <u>Do4</u> . . . . .	78
4.4.4. <u>Re4</u> . . . . .	82
4.4.5. <u>Mi4</u> . . . . .	86
4.4.6. <u>Sib4</u> . . . . .	90
4.5. Conclusiones del Análisis Espectral . . . . .	94
<b>5. Conclusiones y líneas futuras</b>	<b>97</b>
<b>6. Presupuesto</b>	<b>101</b>
<b>APÉNDICES</b>	<b>107</b>

# Lista de Figuras

2.1. <i>Luur</i> (a la izquierda) y <i>bucium</i> rumano (a la derecha) . . . . .	26
2.2. <i>Trompa Judía</i> . . . . .	26
2.3. <i>Trompa con longitudes adicionales de tubo de los hermanos Leichnamschneider</i> .	28
2.4. <i>Trompa Omnitónica</i> , ideada por Dupont en 1818 y consistía en colocar la boquilla en el tudel que correspondía al tono que se desease . . . . .	30
2.5. <i>Tesitura de la Trompa. Notas de escritura, suena en fa, o sea, una 5<sup>a</sup> más grave</i> .	31
2.6. <i>Partes de las que se compone la trompa</i> . . . . .	32
3.1. <i>Representación de un tono puro grave (izquierda), medio(centro) y agudo(derecha)</i>	38
3.2. <i>Formas de onda correspondientes al sonido de diversos instrumentos musicales</i> .	39
3.3. <i>Sonido complejo (arriba) formado por los tres primeros armónicos</i> . . . . .	40
3.4. <i>La adición sucesiva de armónicos con igual fase tiende a producir una onda cuadrada</i>	41
3.5. <i>La superposición de los seis armónicos inferiores, contrafasados alternadamente,</i> <i>permite obtener una onda casi triangular</i> . . . . .	41
3.6. <i>Fases del desarrollo de un sonido: A-ataque; D-decaimiento; S-sostenimiento; R-</i> <i>relajación</i> . . . . .	42
3.7. <i>Tubo Abierto produciendo su sonido fundamental</i> . . . . .	45
3.8. <i>Tubo Abierto produciendo su segundo armónico</i> . . . . .	46
3.9. <i>Armónicos de un sonido fundamental</i> . . . . .	47
3.10. <i>Vibraciones de los labios del trompista</i> . . . . .	48
4.1. <i>STFT como una FFT con ventana de solapamiento. Tomada de [5]</i> . . . . .	55
4.2. <i>STFT ideal. Tomada de [5]</i> . . . . .	56

4.3. Espectrograma Real . . . . .	57
4.4. Ventanas de solapamiento más utilizadas y su espectro en frecuencia . . . . .	59
4.5. Espectrograma para la nota Fa3 ejecutada por la trompa Alexander 103 Amarilla . . . . .	60
4.6. Espectrograma para la nota Fa3 ejecutada por la trompa Alexander 103 Amarilla con la frecuencia de los armónicos 1,2,3,4 y 16 . . . . .	61
4.7. Espectro en frecuencia para la nota Fa3 ejecutada por la trompa Alexander 103 Amarilla . . . . .	62
4.8. Señal original (izquierda) y señal preprocesada (derecha) para la nota Do4 para la trompa Alexander 104 . . . . .	66
4.9. Espectrograma de cada trompa para la nota Fa3 . . . . .	69
4.10. Espectrogramas de las trompas Durk D04 y Durk D03 para la nota Fa3. . . . .	70
4.11. Espectro en frecuencia de cada trompa para la nota Fa3. . . . .	71
4.12. Espectro de las trompas Durk D04 y Durk D03 para la nota Fa3, donde se compara el número de armónicos. . . . .	72
4.13. Espectro de las trompas Alexander 103 Amarilla y Pleischl para la nota Fa3, donde se compara la energía repartida en los ocho primeros armónicos. . . . .	72
4.14. Espectro de las trompas Durk D04 y Yamaha 667D para la nota Fa3, donde se compara la energía repartida en los ocho últimos armónicos. . . . .	73
4.15. Espectro de las trompas Durk D04 y Alexander 104 para la nota Fa3, donde se observa la energía repartida en los armónicos pares frente a la repartida en los impares (primer espectro) y la energía repartida en los armónicos impares frente a la repartida en los pares (segundo espectro) . . . . .	73
4.16. Espectrograma de cada trompa para la nota Sol3. . . . .	75
4.17. Espectrogramas de las trompas Alexander 103 Oro Messing y Schmid para la nota Sol3. . . . .	76
4.18. Espectro en frecuencia de cada trompa para la nota Sol3. . . . .	77
4.19. Espectrograma de cada trompa para la nota Do4. . . . .	79
4.20. Espectrogramas de las trompas Alexander 103 Oro Messing y Durk D03 para la nota Do4. . . . .	80
4.21. Espectro en frecuencia de cada trompa para la nota Do4. . . . .	81
4.22. Espectrograma de cada trompa para la nota Re4. . . . .	83

4.23. Espectrogramas de las trompas Alexander 103 Sin Lacar y Durk D03 para la nota <i>Re</i> <sub>4</sub> . . . . .	84
4.24. Espectro de cada trompa para la nota <i>Re</i> <sub>4</sub> . . . . .	85
4.25. Espectrograma de cada trompa para la nota <i>Mi</i> <sub>4</sub> . . . . .	87
4.26. Espectrogramas de las trompas Alexander 103 Amarilla y Alexander 103 Sin Lacar para la nota <i>Mi</i> <sub>4</sub> . . . . .	88
4.27. Espectro de cada trompa para la nota <i>Mi</i> <sub>4</sub> . . . . .	89
4.28. Espectrograma de cada trompa para la nota <i>Sib</i> <sub>4</sub> . . . . .	91
4.29. Espectrogramas de las trompas Pleischl y Alexander 103 Amarilla para la nota <i>Sib</i> <sub>4</sub> . . . . .	92
4.30. Espectro de cada trompa para la nota <i>Sib</i> <sub>4</sub> . . . . .	93





# Lista de Tablas

3.1. Armónicos de un sonido fundamental . . . . .	39
4.1. Listado de las trompas utilizadas . . . . .	54
4.2. Notas grabadas y sus correspondientes frecuencias . . . . .	54
4.3. Frecuencias de la serie armónica para la nota Fa3 . . . . .	61
4.4. Frecuencias de los ocho primeros armónicos para la nota Fa3 ejecutada por la trompa Alexander 103 Amarilla . . . . .	65
4.5. Frecuencias de los ocho últimos armónicos para la nota Fa3 ejecutada por la trompa Alexander 103 Amarilla . . . . .	65
4.6. Amplitudes de los ocho primeros armónicos para la nota Fa3 ejecutada por la trompa Alexander 103 Amarilla . . . . .	65
4.7. Amplitudes de los ocho últimos armónicos para la nota Fa3 ejecutada por la trompa Alexander 103 Amarilla . . . . .	65
4.8. Matriz de Amplitudes de los ocho primeros armónicos para la nota Fa3 correspon- dientes a cada trompa . . . . .	68
4.9. Matriz de Amplitudes de los ocho últimos armónicos para la nota Fa3 correspon- dientes a cada trompa . . . . .	68
4.10. Matriz de Amplitudes de los ocho primeros armónicos para la nota Sol3 correspon- dientes a cada trompa . . . . .	74
4.11. Matriz de Amplitudes de los ocho últimos armónicos para la nota Sol3 correspon- dientes a cada trompa . . . . .	74

4.12. Matriz de Amplitudes de los ocho primeros armónicos para la nota Do4 correspondientes a cada trompa . . . . .	78
4.13. Matriz de Amplitudes de los ocho últimos armónicos para la nota Do4 correspondientes a cada trompa . . . . .	78
4.14. Matriz de Amplitudes de los ocho primeros armónicos para la nota Re4 correspondientes a cada trompa . . . . .	82
4.15. Matriz de Amplitudes de los ocho últimos armónicos para la nota Re4 correspondientes a cada trompa . . . . .	82
4.16. Matriz de Amplitudes de los ocho primeros armónicos para la nota Mi4 correspondientes a cada trompa . . . . .	86
4.17. Matriz de Amplitudes de los ocho últimos armónicos para la nota Mi4 correspondientes a cada trompa . . . . .	86
4.18. Matriz de Amplitudes de los ocho primeros armónicos para la nota Sib4 correspondientes a cada trompa . . . . .	90
4.19. Matriz de Amplitudes de los ocho últimos armónicos para la nota Sib4 correspondientes a cada trompa . . . . .	90
4.20. Tabla resumen . . . . .	94
6.1. Tiempo empleado en la realización de cada tarea y el tiempo total. . . . .	101
6.2. Costes Personales . . . . .	102
6.3. Costes Materiales . . . . .	102
6.4. Coste Total . . . . .	103
5. Listas de trompas para la nota Fa3 ordenadas en función de cómo esté repartida la potencia en su serie armónica en cuanto: n <sup>o</sup> de armónicos, primeros ocho armónicos, últimos ocho armónicos, armónicos pares frente a armónicos impares y viceversa . . . . .	107
6. Listas de trompas para la nota Sol3 ordenadas en función de cómo esté repartida la potencia en su serie armónica en cuanto: n <sup>o</sup> de armónicos, primeros ocho armónicos, últimos ocho armónicos, armónicos pares frente a armónicos impares y viceversa . . . . .	107

- 
7. Listas de trompas para la nota Do4 ordenadas en función de cómo esté repartida la potencia en su serie armónica en cuanto: n<sup>o</sup> de armónicos, primeros ocho armónicos, últimos ocho armónicos, armónicos pares frente a armónicos impares . 108
  8. Listas de trompas para la nota Re4 ordenadas en función de cómo esté repartida la potencia en su serie armónica en cuanto: n<sup>o</sup> de armónicos, primeros ocho armónicos, últimos ocho armónicos, armónicos pares frente a armónicos impares y viceversa . . . . . 108
  9. Listas de trompas para la nota Mi4 ordenadas en función de cómo esté repartida la potencia en su serie armónica en cuanto: n<sup>o</sup> de armónicos, primeros ocho armónicos, últimos ocho armónicos, armónicos pares frente a armónicos impares . 109
  10. Listas de trompas para la nota Sib4 ordenadas en función de cómo esté repartida la potencia en su serie armónica en cuanto: n<sup>o</sup> de armónicos, primeros ocho armónicos, últimos ocho armónicos, armónicos pares frente a armónicos impares . 109



# Introducción

## 1.1. Motivación

Desde siempre todo músico se ha preguntado si su instrumento es el perfecto para él, si esa es “su” marca, “su” modelo, “su” material. Para encontrar el instrumento adecuado la única opción que hay es probar el máximo número de instrumentos diferentes al que se pueda tener acceso y así poder decidirse por el que cumpla los requisitos básicos que busca cada instrumentista, ya sea en cuanto a sonido, facilidad técnica, comodidad postural a la hora de tocar e incluso diseño. Pero el requisito más importante y que se busca con mayor empeño es el del sonido. Cada músico tiene sus gustos y preferencias, e incluso también manías, por lo que en muchas ocasiones la búsqueda del instrumento “perfecto” puede llegar a ser frustrante.

Debido a esto, la construcción de trompas está en continuo desarrollo. Los constructores buscan siempre mejoras técnicas con el fin de mejorar el sonido y adecuarlo a diferentes gustos, de facilitar la ejecución del instrumento e incluso con el fin de evitar posibles alergias de los intérpretes a los materiales de fabricación.

Por todo esto, la motivación de este proyecto es encontrar una manera de simplificar esta búsqueda del instrumento “ideal” para interpretes y constructores, además de ser este un tema muy interesante para la desarrolladora del proyecto, cuya profesión es la de trompista en una orquesta sinfónica.

## 1.2. Objetivo

El objetivo del proyecto es estudiar el timbre de la trompa mediante el análisis espectral de su señal acústica y, de este modo, poder comparar trompas de diferentes marcas, modelos y materiales de fabricación en función del color de su timbre.

El timbre del sonido de un instrumento se puede clasificar de varias formas: en cuanto a brillantez, luminosidad, oscuridad, opacidad, aspereza, si es penetrante, abierto, rico, lleno, metálico, apagado... Hay que tener en cuenta que esta clasificación es bastante subjetiva, ya que depende de la opinión de la persona que lo percibe, además de que los adjetivos utilizados son bastante abstractos. Pero, a pesar de ello, las opiniones en cuanto a timbre de los músicos se pueden generalizar.

El objetivo de este proyecto también es demostrar que los resultados del análisis espectral del timbre de la trompa coinciden con las sensaciones de los trompistas expertos.

Para llevar a cabo el análisis espectral, se van a utilizar una serie de técnicas para el procesado de señales de audio, como son la Transformada de Fourier Localizada (STFT) y el método de extracción de armónicos propuesto en [13]. Gracias a ellas se pueden obtener las características armónicas de las señales de audio de la base de datos del proyecto y así poder hacer el estudio espectral y la posterior comparación y clasificación de las trompas en función del timbre de cada una.

## 1.3. Estructura de la memoria

La memoria de este Proyecto de Fin de Carrera se estructura en 6 capítulos y un anexo. A continuación, se presenta el contenido de cada uno de ellos como referencia global del conjunto total del proyecto.

1. **Introducción.** La memoria comienza explicando la motivación y los objetivos del proyecto con el fin de que el lector comprenda la necesidad de la realización de este proyecto.
2. **La Trompa.** En este capítulo se presenta el instrumento musical al que hace referencia este proyecto: la trompa. Es importante conocer la historia del instrumento y cómo ha ido evolucionando a lo largo de la historia, tanto a nivel musical como a nivel de mejoras técnicas, para entender el funcionamiento técnico de la trompa en la actualidad.

3. **Características Acústicas de la Trompa.** En este proyecto se quiere estudiar una de las cualidades del sonido de la trompa: su timbre. Para ello, se presenta una visión general del concepto de timbre, explicando las características armónicas de las señales acústicas y profundizando en la estructura armónica de la trompa. Además, se explica detalladamente cómo influye en el timbre de la trompa la manera de producir el sonido, los materiales de fabricación y las partes de la trompa, como la boquilla y la campana.
4. **Análisis Espectral del Timbre de la Trompa.** Este capítulo es el capítulo central del proyecto. En él se estudia el timbre de la trompa a través del análisis espectral de su señal acústica, mediante la utilización de dos técnicas: La **Transformada de Fourier Localizada (STFT)** y el método de extracción de armónicos propuesto en [13]. El objetivo es obtener una serie de conclusiones de acuerdo con los conceptos tímbricos desde el punto de vista del oído experto de un trompista. Se presenta el conjunto de datos del que se hace el estudio, que se corresponde con las grabaciones de seis notas musicales ejecutadas por nueve trompas de diferentes marcas, modelos y materiales de fabricación. A continuación, se explican las herramientas utilizadas para llevar a cabo el análisis espectral, junto a su aplicación en el presente proyecto. El análisis espectral de las señales acústicas está dividido en seis apartados, uno por cada nota musical empleada en el estudio. En cada apartado se realiza el análisis espectral para cada trompa y la comparación de los resultados, pudiendo de este modo clasificar las trompas en cada caso dependiendo de cómo esté repartida la energía de su correspondiente señal acústica a lo largo de su serie armónica. Para terminar, se presentan las conclusiones de este análisis espectral de acuerdo con los conceptos tímbricos de un trompista.
5. **Conclusiones y líneas futuras.** En este capítulo se presentan las conclusiones finales del estudio a partir de los resultados obtenidos del análisis espectral del timbre de la trompa. Además, se hace referencia a las líneas futuras que se podrían llevar a cabo para mejorar o ampliar el estudio de la trompa.
6. **Presupuesto.** Este capítulo presenta una estimación del presupuesto final necesario para el desarrollo del proyecto. Para el cálculo del mismo se tienen en cuenta los costes del material empleado y los costes de los honorarios de los desarrolladores.





# Capítulo 2

## La Trompa

### 2.1. Introducción

Desde la Antigüedad, la trompa fue usada sólo para emitir señales, pero pronto se le atribuyeron funciones religiosas y sociales que, en algunos casos, se han conservado hasta la actualidad, hasta llegar a la trompa de orquesta que conocemos hoy. La trompa es sin duda alguna uno de los instrumentos que ha sufrido las más espectaculares modificaciones técnicas [15].

### 2.2. Historia

Las primeras trompas, utilizadas para emitir señales de advertencia, se fabricaban ya en el Paleolítico con cuernos de diferentes animales (mamuts, elefantes, búfalos, antílopes, bueyes). Aunque existían modelos diferentes, en todas partes respondían a una utilización parecida de carácter eminentemente práctico. Además de estas trompas de cuerno, en la Edad del Bronce (1500 a.C) se utilizaban los *luur*, instrumentos cuya longitud de tubo oscilaba entre los dos y los tres metros y que se tocaba a pares. La delgadez de los tubos requería un avanzado estadio constructivo que desapareció posteriormente y que no se recuperó hasta la Edad Media. Junto a los *luur*, modelos propios de los países nórdicos, algunos autores han mencionado también el *rojok* ruso y el *bucium* rumano como antecedentes de la trompa (Ver Fig. 2.1).



Figura 2.1: *Luur* (a la izquierda) y *bucium* rumano (a la derecha)

### 2.2.1. Un instrumento práctico

La trompa no desempeñaba un papel musical en ninguno de los casos citados, más bien estaba reservada a usos ceremoniales y prácticos. Esto mismo sucedió con el *shofar* judío o *trompa de carnero*, uno de los ejemplares de trompa más antiguos que se conocen (Fig. 2.2). En este caso, su construcción responde más a motivos religiosos que musicales, ya que se obtenía después de haber sacrificado ritualmente un carnero. Además de su utilización ritual, el uso militar del *shofar* está documentado en la toma de Jericó, donde su sonido se dice que fue el responsable de la caída de las murallas. En la actualidad se utiliza todavía en las ceremonias religiosas judías.



Figura 2.2: *Trompa Judía*

Posteriormente, la trompa romana, probablemente derivada de un modelo etrusco semicircular de terracota de gran sonoridad, se agrupaba en cuatro modelos bajo la denominación genérica de *cornu*. Existían, asimismo, dos tipos de trompa metálica: el *litus* o trompeta de caballería y la *tuba*. Al parecer, tampoco en Roma la música era el propósito final de estos instrumentos, que ocupaban un lugar destacado en los acontecimientos de índole militar.

La caída del Imperio Romano supuso un retroceso en las técnicas de fabricación de los tubos metálicos en general. Durante los primeros siglos de la Edad Media se registró el regreso a la

variante de trompa obtenida a partir de un cuerno de origen animal. El instrumento se utilizaba para hacer señales en el campo de batalla y era también utilizado por ciertos cazadores.

La utilización de la trompa en la vida cotidiana de esta época se demuestra en Holanda, donde, según parece, los panaderos la utilizaban para informar de que el pan ya podía sacarse del horno. Asimismo, en Alemania los carniceros indicaban mediante distintas señales que la carne había llegado. También los vigilantes de las ciudades importantes contaban con un cuerno para anunciar ciertas noticias. En estos casos, la competencia entre capitales dio lugar a instrumentos ricamente ornados, como, por ejemplo, el *grüselhorn* de bronce utilizado durante el siglo XV en Estrasburgo o el *harsthorn* de oro utilizado en Lucerna. Todas estas trompas coexistían con modelos de dimensiones más reducidas en las cacerías de los nobles.

### 2.2.2. La trompa de caza se incorpora a la orquesta

Antecedora directa de la trompa actual, la trompa de caza fue durante siglos un instrumento indispensable en las cacerías. Se establecieron diversas llamadas para distinguir a los animales, reunir a los cazadores, indicar si se había retirado la presa, etc. El modelo de caza de los siglos XV al XVII, que era un círculo metálico simple, dio lugar a la trompa helicoidal, en la que los círculos se enrollaban de forma más cerrada. El consiguiente aumento de la longitud del tubo fue en paralelo al incremento de las posibilidades musicales de la trompa. Al contrario que su predecesora, la trompa helicoidal no se popularizó en las cacerías debido, sobre todo, a su mayor peso.

Durante la segunda mitad del siglo XVII era habitual fabricar trompas de mayor diámetro y de dos o dos vueltas y media de tubo. Estas mejoras coincidieron con la primera utilización de la trompa con propósito musical de la que se tiene noticia (1670).

Cuando se habla de la trompa orquestal, se suele hacer referencia a lo que se ha dado en llamar el “modelo francés” debido a los orígenes supuestamente galos del instrumento. Hasta principios del siglo XVIII la trompa francesa no se incorporó a una orquesta inglesa, cuando por vez primera Haendel la incluyó en su *Música acuática*, estrenada en 1717. De hecho, hasta finales del siglo XVII el uso de la trompa se limitó al teatro, donde sólo se hacía sonar de modo esporádico. En la orquesta, el uso de la trompa de caza no se generalizó hasta entrado el siglo XVIII, coincidiendo con la introducción de notables mejoras técnicas en el instrumento.

La primera utilización de la trompa ya como integrante de la orquesta se debe a la ópera

*Octavia* (1705), de Reinhard Keiser. Por aquel entonces, sin embargo, los trompistas eran en su mayoría trompetistas que tocaban la trompa como segundo instrumento, una prueba más de la todavía poca importancia que le concedían los compositores.

### 2.2.3. Primeras mejoras técnicas

En el siglo XVII se conocían varios tipos de instrumento: en Alemania se favorecía un modelo curvo (en 1710 los hermanos Leichnamschneider fabricaron el primer prototipo de trompa natural en Fa), mientras que en Inglaterra se prefería la trompa recta, de timbre más penetrante. Fueron precisamente dichos hermanos quienes aplicaron a principios del siglo XVIII un sistema de longitudes de tubo adicionales a la trompa natural que ampliaban la capacidad melódica del instrumento (Fig. 2.3). Los tubos intercambiables, que fueron perfeccionándose, se construían en juegos de seis. A primera vista era una solución a los problemas planteados por el modelo precedente, pero presentaba notables inconvenientes: el intérprete debía llevar consigo 13 adaptadores desmontables diferentes, uno por tonalidad, que tenía que insertar en el cuerpo del instrumento cuando era necesario. Los compositores, conscientes de esa dificultad, dejaban tiempo en sus obras para que los ejecutantes hicieran el cambio de tubo cuando la composición modulaba. Los sonidos tapados, obtenidos mediante la obstrucción de la salida de aire con la mano derecha, todavía no estaban en uso.



Figura 2.3: *Trompa con longitudes adicionales de tubo de los hermanos Leichnamschneider*

No obstante, el invento de los hermanos Leichnamschneider de Viena seguía presentando un inconveniente: la distancia entre la boquilla y la campana variaba cada vez que se intercambiaban los anillos tubulares. La *inventionhorn* o *trompa de invención* concebida por Joseph Hampl, de Dresde, constituyó la solución definitiva. Alrededor de 1750 el constructor de instrumentos

Johann Werner fue el encargado de contruir el prototipo. De hecho, cada tonillo era una parte de tubo enrollado independiente de la longitud adecuada para cada tonalidad pero, a diferencia del modelo patentado por los vieneses, los cambios tenían lugar en el interior de la circunferencia metálica, por lo que la distancia entre la boquilla y la campana se mantenía estable.

Anton Joseph Hampl perfeccionó asimismo un método interpretativo basado en la trompa natural y desarrollado inicialmente por los intérpretes bohemios a mediados del siglo XVIII. Se trataba de situar la mano derecha en la campana y, así, tapar total o parcialmente el tubo, de manera que las notas podían alterarse, con lo que se llenaban los vacíos propios de las notas naturales.

El cambio más radical al que se enfrentaría la trompa estaba aún por llegar. En 1815 se inventó la trompa omnitónica en Francia (Fig. 2.4), paralelamente al desarrollo de los primeros instrumentos provistos de pistones. J.B. Dupont intentó fabricar una trompa totalmente cromática sin longitudes extra de tubo que se pudiera tocar en cualquier tonalidad. Diferentes recursos mecánicos permitían la modulación que, al contrario de lo que ocurría con el sistema de pistones, no era instantánea. En Alemania, Heinrich Stölzel y Blühmel desarrollaron el primer modelo de pistones que, a pesar de que permitía obtener todas las notas sin recurrir a la técnica del tapado, no fue aceptado en los círculos oficiales hasta principios del siglo XX. Sin embargo, a lo largo del siglo XIX numerosos constructores se dedicaron a mejorar el mecanismo y los compositores no dudaron en incluir a la trompa de pistones en sus obras desde el segundo tercio del siglo. Así, el primero en incorporarla a la orquesta fue Halévy en la ópera *La juive* (1835) y, poco después, Schumann escribió su *Adagio y Allegro en La bemol, op. 70, para trompa y piano*. Asimismo, se cree que Beethoven escribió el solo para trompa en el movimiento lento de la *Novena Sinfonía* para el cuarto intérprete de trompa en la orquesta, puesto que era el único que tocaba un modelo de pistones.

Este mecanismo, que alargaba la longitud útil del tubo según la tonalidad, convirtió la trompa en un instrumento cromático y asentó las bases para la generalización de su uso en la orquesta sinfónica.

Una de las dificultades de la trompa reside en conseguir la nota justa en el registro alto, puesto que se encuentran muy próximas las unas de las otras. Fritz Krupse diseñó en 1898 una trompa doble para solventar este problema. Se trata, en definitiva, de dos trompas en una: cada una dispone de su propio sistema de válvulas, pero ambas comparten, en cambio, la misma boquilla



Figura 2.4: *Trompa Omnitónica*, ideada por Dupont en 1818 y consistía en colocar la boquilla en el tudel que correspondía al tono que se desease

y campana. Afinada en Fa y en Si bemol, el intérprete escoge la tonalidad mediante una válvula adicional. Así se solventa la gran dificultad que presentaba la ejecución de las notas agudas. La trompa doble es la más utilizada en la orquesta.

### 2.3. Características Técnicas de la Trompa

La trompa es un instrumento único entre los que integran la orquesta porque los cilindros se accionan con la mano izquierda y porque se toca con la campana dirigida hacia la parte trasera de la orquesta. Considerado el más expresivo de los instrumentos de la sección de viento-metal, la trompa es quizás el más difícil de tocar.



Su apariencia es la de un tubo metálico de sección cónica enrollado sobre sí mismo. Estrecho en la parte de la boquilla, el tubo se ensancha hasta llegar al pabellón o campana, muy abierto. En el interior de la circunferencia metálica se encuentran diversas vueltas de tubo, así como el sistema de válvulas o cilindros que permite modificar la longitud del mismo y, por consiguiente, alterar el sonido resultante.

Construida en cobre o latón cromado, la trompa posee un tubo cuya longitud supera los tres metros.

### 2.3.1. Características Técnicas

- Existen diversos modelos de trompa circular, entre los que cabe citar la de postillón, la natural, la trompa en fa, la trompa doble (la más frecuente) y la trompa tenor en do o en si bemol, de características similares a la tuba.
- La extensión sonora de la trompa es de tres octavas y media. El registro de la trompa va desde un  $\text{sibemol}_1$  hasta un  $\text{fa}_5$ . Puede alcanzar sonidos más extremos (desde un  $\text{fa}_1$  hasta un  $\text{sibemol}_5$ ), pero se desalienta su uso, debido a que son muy arriesgados y difíciles de ejecutar.



Figura 2.5: *Tesitura de la Trompa. Notas de escritura, suena en fa, o sea, una 5ª más grave*

- Es un instrumento transpositor, lo cual quiere decir que la nota que se oye no es la que aparece escrita en la partitura, sino que es una quinta inferior. Habitualmente está afinada en Fa. Aunque la trompa más usada en la actualidad sea la doble, el compositor escribe como si la trompa estuviera en Fa. Las notas agudas se escriben en clave de sol y suenan una quinta justa más graves de lo que está escrito. En cambio, las notas más graves se escriben en clave de fa y (por una convención absurda y complicada) están indicadas una octava más grave de lo necesario. De esta manera, si está escrito un  $\text{fa}_4$  en clave de sol o un  $\text{fa}_3$  en clave de fa, el sonido real será un  $\text{sib}_3$  (que es la quinta justa descendente de  $\text{fa}_4$ ).
- La boquilla, un cono truncado de metal sobre el que el instrumentista apoya sus labios, es

un elemento determinante en el sonido final de la trompa. Cada instrumentista escoge la que mejor le convenga de acuerdo con su técnica, su estilo y sus rasgos físicos particulares.

- Los cilindros o válvulas rotatorias controlan dos juegos de tubos adicionales. La maquinaria que acompaña a los cilindros incluye una serie de palancas que son las que el ejecutante acciona con su mano izquierda para cambiar el tono del instrumento. Además de los cilindros para cambiar la tonalidad, en el caso de la trompa doble existe una cuarta palanca adicional que permite escoger entre los dos tonos básicos de la trompa: fa o si bemol.
- Más de tres metros de tubo se enrollan sobre sí mismos para dar forma al cuerpo del instrumento. Aproximadamente la longitud en una trompa doble de la trompa en Sib es de 2.75 m y la de la trompa en Fa de 3.65 m. Además de las longitudes de tubo que dependen de los cilindros, existe una parte de él no sometida a la acción de estos. Se trata de la bomba de afinación, de la que el ejecutante se sirve para afinar el instrumento.
- La trompa posee una gran campana en relación al diámetro del tubo. La función de esta parte, además de propagar el sonido al exterior, es el de estabilizarlo, de manera que la estridencia de los agudos se apaga al tiempo que se favorecen los graves.

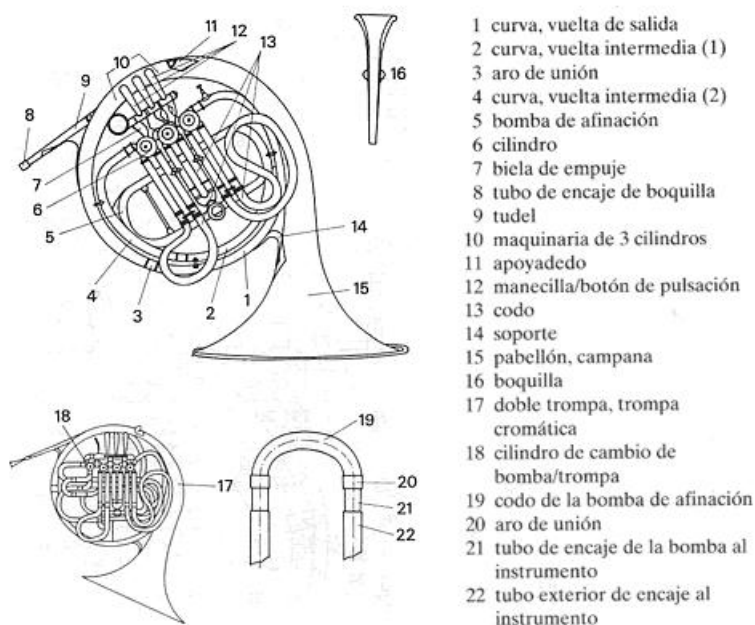


Figura 2.6: Partes de las que se compone la trompa



- El timbre de la trompa es muy variable. En pasajes lentos resulta dulce y profundo, pero puede obtenerse también una sonoridad enérgica y brillante.
- El sonido se produce por la vibración del aire al pasar por los labios del ejecutante. A continuación el aire penetra en el interior del tubo, donde recorre un largo camino y resuena hasta salir por la campana.
- El intérprete acciona las válvulas con la mano izquierda mientras mantiene la derecha en el interior de la campana.
- El trompista puede tocar lo que se llaman *sonidos tapados*, para lo cual introduce la mano derecha en el interior de la campana, taponándola ligeramente. Así, el sonido resultante posee un timbre más metálico y delgado.
- En ocasiones se utiliza la sordina para obtener un sonido diferente.
- El tubo de la trompa, a diferencia de lo que ocurre con la trompeta, es cónico en su totalidad, aunque los tubos de las bombas de afinación deben ser necesariamente cilíndricos.
- La campana de la trompa, a diferencia de lo que ocurre en el resto de los metales, está enfocada hacia la parte trasera del instrumentista.
- En la orquesta sinfónica, las trompas suelen situarse delante de la percusión, aunque algunos directores prefieren ubicarlas en la parte derecha, a lado de los fagots. Las trompas unen el sonido propio de los metales con la sección del viento-madera.



## Características Acústicas de la Trompa

### 3.1. Introducción

Se conoce como “sonido” a la sensación que, percibida por el oído, tiene su origen en el movimiento vibratorio de los cuerpos, el cual es transmitido por un medio, por ejemplo, el aire [10].

El sonido se produce como resultado de las vibraciones de los cuerpos elásticos sometidos al efecto del choque o roce con un agente externo. Esta vibración transmitida en forma de movimiento ondulatorio impresiona el sentido del oído, experimentándose la sensación sonora. Por tanto, el sonido se puede definir como la sensación experimentada cuando llegan al oído ondas producidas por determinados movimientos vibratorios. Para que se produzca un sonido se requiere la existencia de un cuerpo vibrante llamado “foco” (una cuerda tensa, una varilla, una lengüeta...) y del medio elástico transmisor de esas vibraciones, las cuales se propagan a su través constituyendo la onda sonora.

Como onda, el sonido responde a las siguientes características:

1. Es una onda **mecánica**

Las ondas mecánicas no pueden desplazarse en el vacío, necesitan hacerlo a través de un medio material (aire, agua, cuerpo sólido).

Además, de que exista un medio material, se requiere que éste sea elástico. Un medio rígido no permite la transmisión del sonido, porque no permite las vibraciones.

La propagación de la perturbación se produce por la compresión y expansión del medio

por el que se propagan. La elasticidad del medio permite que cada partícula transmita la perturbación a la partícula adyacente, dando origen a un movimiento en cadena.

2. Es una onda **longitudinal**

El movimiento de las partículas que transporta la onda se desplaza en la misma dirección de propagación de la onda.

3. Es una onda **esférica**

Las ondas sonoras son ondas tridimensionales, es decir, se desplazan en tres direcciones y sus frentes de ondas son esferas radiales que salen de la fuente de perturbación en todas las direcciones. El principio de Huygens afirma que cada uno de los puntos de un frente de ondas esféricas puede ser considerado como un nuevo foco emisor de ondas secundarias también esféricas, que como la originaria, avanzarán en el sentido de la perturbación con la misma velocidad y frecuencia que la onda primaria.

### 3.1.1. Cualidades del Sonido

Entre dos sonidos distintos, el sentido del oído tiene la posibilidad de distinguir características particulares y diferenciadoras entre ambos que sirven para identificarlos. Estas características particulares se denominan cualidades del sonido. Las cualidades que se distinguen en toda sensación sonora, son tres:

1. *Intensidad o sonoridad*

Es la mayor o menor amplitud de las ondas y depende de la fuerza con que son producidas. Las variaciones de intensidad han dado lugar en la música a las diferencias de matices, creando con ello una enorme riqueza emotiva. La Intensidad se mide en decibelios (dB).

2. *Altura*

Los sonidos musicales son producidos por algunos procesos físicos como por ejemplo, una cuerda vibrando, el aire en el interior de un instrumento de viento, etc. La característica más fundamental de esos sonidos es su “elevación” o “altura”, o cantidad de veces que vibra por segundo, es decir, su frecuencia. La frecuencia se mide en Hertz (Hz) o número de oscilaciones o ciclos por segundo. Cuanto mayor sea su frecuencia, más aguda o “alta” será la nota musical. La altura es una propiedad subjetiva de un sonido por la que puede

compararse con otro en términos de “alto” o “bajo”. Los sonidos de mayor o menor frecuencia se denominan respectivamente, agudos o graves; términos relativos, ya que entre los tonos diferentes uno de ellos será siempre más agudo que el otro y a la inversa.

Mientras que la frecuencia de un sonido, es una definición física cuantitativa, que se puede medir con aparatos sin una referencia auditiva, la elevación es nuestra evaluación subjetiva de la frecuencia del sonido. La percepción puede ser diferente en distintas situaciones, así para una frecuencia específica no siempre tendremos la misma elevación.

La frecuencia de las vibraciones de instrumentos de un mismo tipo es proporcional a sus dimensiones lineales.

### 3. *Timbre*

Es la forma vibratoria de la onda sonora y se manifiesta como la calidad del sonido. Gracias al timbre, es posible distinguir el instrumento o agente productor del sonido, aunque se produzcan varios sonidos a la vez con el mismo tono o altura.

## 3.2. El Timbre

El timbre es la cualidad que permite distinguir un mismo sonido, producido por distintos instrumentos. Hasta los oídos menos educados musicalmente son capaces de distinguir una misma nota emitida, por ejemplo, por un piano, un violín y un oboe. El sistema psicoacústico humano tiene una extraordinaria facilidad para distinguir los timbres de los sonidos y las razones de este hecho hay que buscarlas en la Teoría de la Evolución Natural. Ciertamente, el oído humano no llega a los umbrales de sensibilidad de otros animales (conejos, gacelas, etc) cuya supervivencia depende de escuchar cuanto antes al depredador. Más bien, Homo Sapiens siguió el camino evolutivo de la colaboración y comunicación social y para ello era muy importante disponer de un sentido del oído que permitiera reconocer por la voz a los distintos individuos del grupo y que permitiera además decodificar con eficacia los sonidos extraordinariamente complejos del mensaje hablado.

Se va a profundizar más en esta cualidad del sonido que en el resto debido a que el tema principal de este trabajo de investigación se basa precisamente en la diferencia tímbrica entre trompas de diferentes marcas, modelos y materiales.

### 3.2.1. Tonos Puros y Tonos Complejos

Se llama *tono puro* o *senoidal* a aquel sonido cuya representación gráfica puede hacerse mediante una curva sinusoidal (ver la figura 3.1). No es normal la presencia de tonos senoidales aislados en el mundo natural; realmente, la única forma de escucharlos es produciéndolos con algún dispositivo artificial (sintetizador, ordenador, oscilador, etc).



Figura 3.1: Representación de un tono puro grave (izquierda), medio(centro) y agudo(derecha)

Los sonidos naturales son producidos por las vibraciones de los objetos y sucede que las formas de vibración de los cuerpos no son sencillas sino que presentan unos *modos de vibración* simultáneos cuyas frecuencias propias suelen ser aproximadamente múltiplos superiores de una inferior llamada *fundamental*. Así, cuando un cuerpo entra en vibración lo hace vibrando con todos sus modos, en consecuencia, el sonido emitido es complejo y generalmente está constituido por una frecuencia fundamental y otras superiores de valores próximos a los múltiplos de la fundamental. La superposición de todas ellas constituye un *sonido complejo*.

Aquellos sonidos cuyas frecuencias son múltiplos de la de otro, que llamamos *fundamental*, se dice que son sus *armónicos*; así, para un sonido fundamental de frecuencia  $f$  y longitud de onda  $\lambda$ , sus armónicos serán los expresados en la tabla 3.1.

En la mayoría de los sonidos de los instrumentos musicales, las frecuencias superiores a la fundamental no son múltiplos exactos de esta última. La razón hay que buscarla en la no idealidad del comportamiento vibratorio de los instrumentos. Si bien es cierto que las frecuencias superiores del sonido de un piano, de un violín o de un clarinete son muy próximas a los múltiplos de la fundamental no menos cierto es que en el caso de instrumentos como el timbal, la campana o la celesta esas frecuencias superiores se alejan mucho de los valores múltiplos. Por ello, en el caso de los sonidos reales de los instrumentos, se prefiere denominar *parciales* a esas frecuencias, reservándose el término *armónicos* a los múltiplos exactos.

Tabla 3.1: Armónicos de un sonido fundamental

	<i>FRECUENCIA</i>	<i>LONGITUD DE ONDA</i>
<i>Fundamental</i>	$f$	$\lambda$
<i>2º armónico</i>	$2f$	$\lambda/2$
<i>3º armónico</i>	$3f$	$\lambda/3$
...	...	...
<i>nº armónico</i>	$nf$	$\lambda/n$

En el registro gráfico de dos sonidos de la misma frecuencia se reconoce el timbre por la distinta forma de las curvas. Esta cualidad se debe a que el sonido producido nunca es simple, sino el resultado de la combinación de la frecuencia fundamental y sus armónicos o parciales. Según la clase e intensidad de esos armónicos resultará un timbre u otro (ver fig. 3.2).

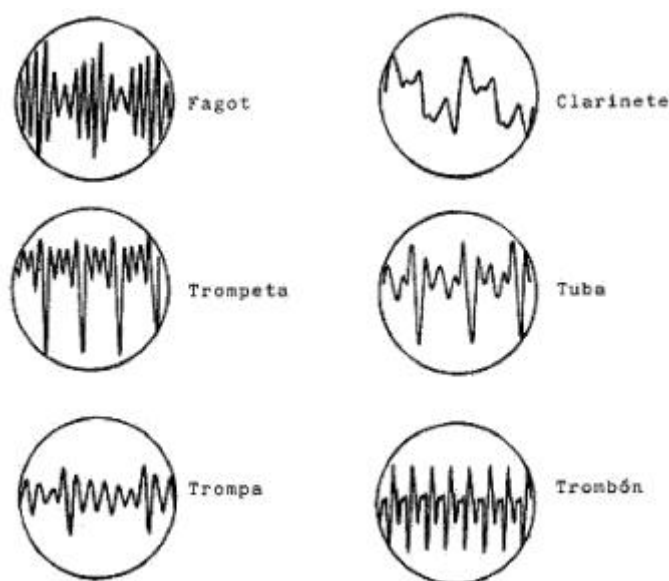


Figura 3.2: Formas de onda correspondientes al sonido de diversos instrumentos musicales

En la figura 3.3 se muestran la frecuencia fundamental y los armónicos 2º y 3º de un sonido complejo, así como el resultado de su superposición. Se aprecia en ella que, a diferencia de los sonidos sinusoidales puros, los sonidos complejos tienen formas de onda que, siendo periódicas, no son senoidales.

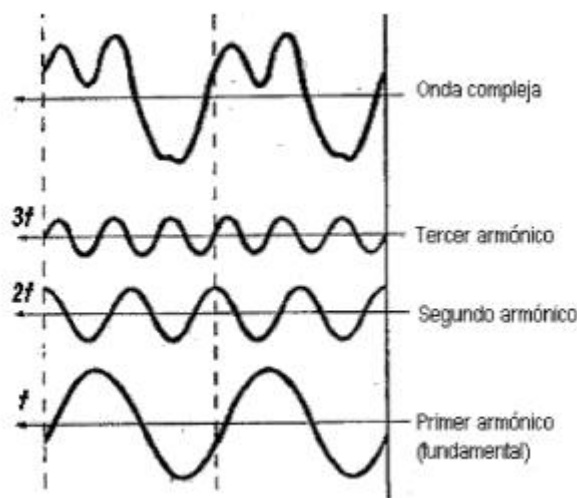


Figura 3.3: *Sonido complejo (arriba) formado por los tres primeros armónicos*

El matemático F.M. Fourier <sup>1</sup> dedujo su célebre teorema, según el cual *toda onda periódica compleja* (el sonido lo es) *puede descomponerse en suma de términos armónicos simples cuyas frecuencias son múltiplos enteros de la rapidez de repetición de la onda*. Por tanto, para una onda compleja, su amplitud en función del tiempo  $\Psi(t)$  puede expresarse como una sucesión de términos senoidales y cosenoidales (armónicos):

$$\Psi(t) = \frac{1}{2}a_0 + a_1\cos wt + a_2\cos 2wt + a_3\cos 3wt + \dots + b_1\sen wt + b_2\sen 2wt + b_3\sen 3wt + \dots \quad (3.1)$$

donde  $a_1, a_2, a_3, \dots$  y  $b_1, b_2, b_3, \dots$  son las contribuciones de cada armónico puro a la conformación de la onda compleja y  $w$  es la llamada “frecuencia angular” de la onda, la cual es proporcional a la *frecuencia fundamental* de la misma según la expresión:

$$w = 2\pi f \quad (3.2)$$

donde  $w, 2w, 3w, \dots$  son las frecuencias angulares de los armónicos primero, segundo, tercero, ...

En la figura 3.4 se representan tres ondas (A) de frecuencias  $f, 3f$  y  $5f$ ; en (B) se muestra la resultante obtenida al sumar las tres anteriores y en (C) aparece la misma composición, pero

<sup>1</sup>Joseph Fourier (1768-1830) ideó la forma de desarrollar en forma de sucesiones convergentes cierto tipo de funciones matemáticas discontinuas; dichas series se conocen como *sucesiones de Fourier*. Sus aportaciones han contribuido muy notablemente al análisis matemático y al desarrollo de la Ondulatoria en Física



haciendo intervenir los armónicos de frecuencias  $f$ ,  $3f$ ,  $5f$ ,  $\dots$ ,  $35f$  y  $37f$ , es decir, los diecinueve primeros términos de esta serie. El resultado es una onda casi cuadrada.

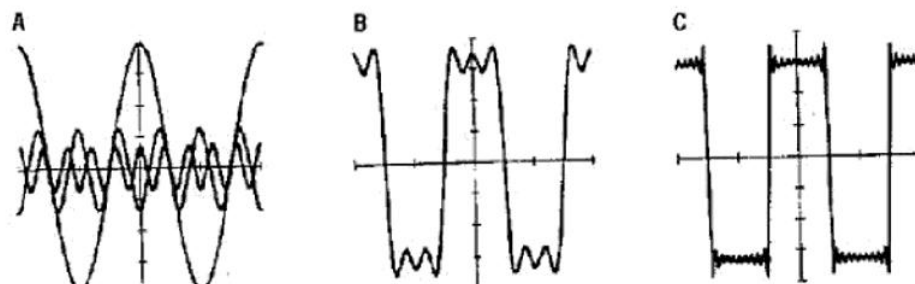


Figura 3.4: La adición sucesiva de armónicos con igual fase tiende a producir una onda cuadrada

Este hecho sugiere la idea de que todo sonido musical, cualquiera que sea su timbre, puede obtenerse por adición de un número infinito de armónicos, si bien en la práctica, y por fortuna, puede alcanzarse una buena aproximación al sonido deseado por adición de unos pocos armónicos. La figura 3.5 muestra cómo con sólo seis armónicos inferiores, contrafasados alternadamente, puede obtenerse una onda casi triangular.

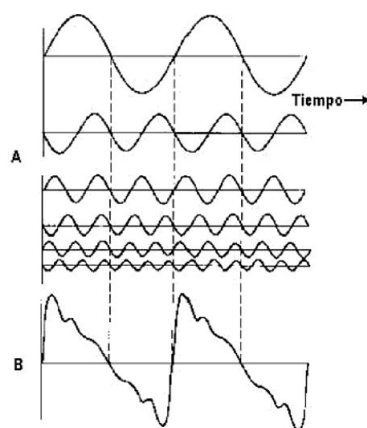


Figura 3.5: La superposición de los seis armónicos inferiores, contrafasados alternadamente, permite obtener una onda casi triangular

Para finalizar añadiremos que el timbre de un instrumento musical puede variar circunstancialmente dentro de ciertos márgenes, así, en un instrumento de cuerda, depende de dónde y cómo sea pulsada, si es un tubo de órgano dependerá de si es abierto o cerrado, si es de viento dependerá del tipo de embocadura, etc.

### 3.2.2. Profundización sobre el concepto de Timbre

Identificar el timbre de un sonido con la composición espectral de sus armónicos con exclusividad es un planteamiento excesivamente simplista. La sensación del timbre de los sonidos depende de un elevado número de parámetros y por otro lado, los mecanismos psicoacústicos de percepción son muy complicados y sujetos a numerosas influencias. Veamos algunos factores que tienen influencia en el timbre:

#### 1. *Evolución temporal de la amplitud.*

Ciertamente, nuestro sistema auditivo actúa como un analizador, percibiendo todos y cada uno de los armónicos de un sonido complejo y detrayendo de la suma de percepciones la sensación de timbre. Ahora bien, la composición espectral de un sonido complejo no es la misma desde su inicio hasta su extinción. Por otro lado, la variación de la intensidad sigue la pauta señalada en la figura 3.6.

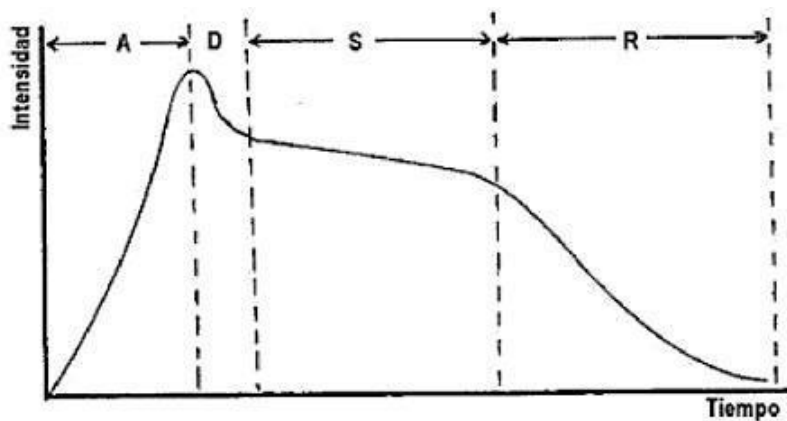


Figura 3.6: *Fases del desarrollo de un sonido: A-ataque; D-decaimiento; S-sostenimiento; R-relajación*

En ella se aprecia que el inicio del sonido corresponde a una subida (generalmente abrupta) de la intensidad que llamamos *ataque*. Una vez que la intensidad ha subido hasta su valor más elevado se produce una bajada rápida de la intensidad (*decaimiento*). Le sigue luego una fase más o menos mantenida, llamada *sostenimiento* para finalizar con la fase de *relajación* o *extinción*. Según el tipo de instrumento, las cuatro fases tienen distinta duración y distinta pronunciación, incluso, un mismo instrumento puede variar en todo o

en parte su desarrollo temporal según sea ejecutado. Así, por ejemplo, los pianos, las guitarras, los instrumentos de percusión en general, se caracterizan por sonidos con un ataque muy pronunciado. En el caso del piano, las fases de sostenimiento y relajación pueden ser muy largas (máximo si se pisa el pedal) e igual sucede con las campanas, sin embargo, el tambor o la caja acústica tienen sonidos secos, con sostenimiento y relajación muy cortos. Otros instrumentos, como el órgano, el violín, la voz, el oboe, etc, pueden tener ataques muy suaves.

En muchas ocasiones, la distinción entre sonidos de diferentes instrumentos la hacemos en función, más de la evolución de la envolvente temporal de la amplitud que de la composición espectral.

2. *El timbre de los instrumentos musicales no es igual a lo largo de toda su tesitura.*

Si se hace el análisis espectral de las diferentes notas que un mismo instrumento puede emitir, veremos que la composición varía de unas notas a otras. Generalmente asumimos que el timbre de un instrumento que interpreta una escala es el mismo en todas las notas, y que lo único que varía es la frecuencia fundamental y las de sus armónicos superiores. Sin embargo esto no es así, en realidad, cada nota de un mismo instrumento tiene su propio timbre, distinto al de las restantes. Esto es algo que todo instrumentista intenta solucionar, trabajando de tal forma que haya las mínimas diferencias tímbricas en toda la tesitura del instrumento.

3. *El timbre de los instrumentos depende de cómo sean ejecutados.*

Si bien es la voz el más versátil y expresivo instrumento musical, en general los instrumentos musicales son susceptibles de emitir sonidos de distintos timbres y acentos según sean ejecutados. Así, por ejemplo, los más susceptibles de modificar su timbre son los que se ejecutan directamente con la mano, como es por ejemplo, el caso de la guitarra. En este instrumento si se actúa la cuerda con la yema del dedo el sonido tiene un ataque más suave y dulce que si se pulsa con la uña o con púa. Si se actúa sobre la cuerda en un punto próximo al puente el sonido es más metálico (rico en armónicos superiores) que si se pulsa en un punto más central. En el caso de los timbales, la percusión del parche en su punto central produce un sonido apagado y carente de timbre, justo lo contrario sucede si se percute en una zona marginal.

4. *El timbre de los instrumentos está influenciado por las condiciones acústicas ambientales.*

Las reflexiones del sonido en las paredes, techo y suelo del recinto donde suenan y son escuchados influyen notablemente en su timbre. Cuando una onda se refleja, la incidente y la reflejada se superponen dando lugar a zonas de reforzamiento de la vibración (vientres) y de atenuación de esta (nodos). Se da el caso de recintos que ofrecen buenas reflexiones para las frecuencias agudas pero no para las graves y viceversa. En el primer caso, la reverberación predominante en agudos hace que los sonidos sean percibidos más brillantes que en el caso de los recintos donde predomine la reverberación en graves; en este segundo caso los sonidos resultan más envolventes e intimistas.

### 3.3. Estructura Armónica de la Trompa

Como ya se ha visto en el capítulo anterior, la trompa es un tubo cilíndrico-cónico de metal, por lo que su funcionamiento está regido por las leyes acústicas de los tubos abiertos.

En el caso de la trompa y del resto de instrumentos de viento, el cuerpo sonoro es en realidad la columna gaseosa y no el tubo que la contiene, pues este tiene únicamente la misión de definir la forma de aquella, pero fuera de esto, influye relativamente poco sobre los fenómenos sonoros.

A diferencia de las cuerdas, que vibran transversalmente, las vibraciones del gas contenido en un tubo sonoro, en este caso de una trompa, son longitudinales, si bien, al igual que en las cuerdas, se forman ondas estacionarias con zonas de vibración nula (nodos) y zonas de vibración máxima (vientres) [10].

En los extremos abiertos de un tubo sonoro la reflexión que se produce está en función de la anchura del tubo y de la abertura, comparada con la longitud de onda que se propaga por el tubo. En el caso de la trompa el tubo es demasiado estrecho y no se puede disipar toda la energía en el extremo abierto, por lo que se produce el fenómeno de la reflexión. Debido a esto se produce una onda estacionaria en el interior. Esta onda estacionaria proporciona dos vientres en los extremos, con lo cual el sonido fundamental se produce cuando en el centro se forme un nodo (Fig. 3.7).

$\lambda$  es la longitud de la onda, es decir el espacio que recorre la onda en un ciclo. Como tanto la onda de salida (verde) como la onda reflejada (rojo) solo realizan medio ciclo dentro del tubo, tenemos que la Longitud del Tubo es la mitad de la Longitud de Onda ( $\lambda/2$ ).

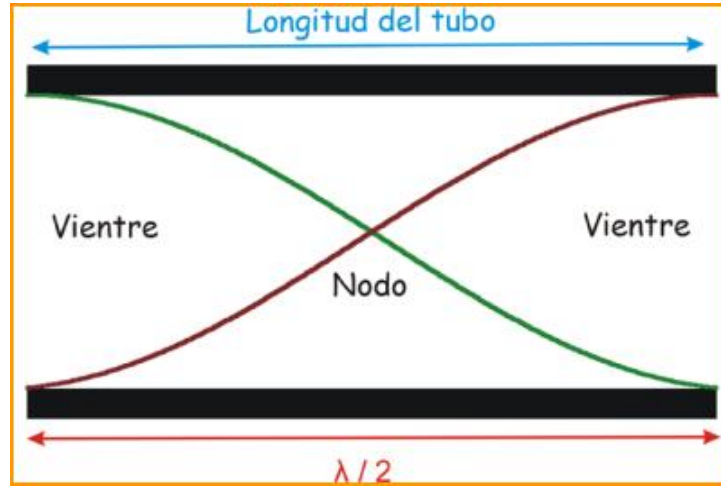


Figura 3.7: *Tubo Abierto produciendo su sonido fundamental*

$$L = \lambda/2 \quad (3.3)$$

La frecuencia del sonido fundamental ( $f_1$ ), dependerá de la velocidad de propagación del medio ( $c_{aire} = 330$  m/s) y de la longitud de onda ( $\lambda$ ). En el caso del aire, en un segundo una onda recorrerá 330 metros, y tenemos una onda de  $\lambda$  metros, si dividimos  $330/\lambda$  obtendremos el número de ciclos que se sucederán en un segundo, o sea, la Frecuencia (Hz).

Con todo esto se tiene que:

$$f_1 = \frac{c}{\lambda} \quad (3.4)$$

Despejando  $\lambda$  de la ecuación 3.3:

$$\lambda = 2L \quad (3.5)$$

y sustituyendo en la ecuación 3.4, la frecuencia fundamental queda:

$$f_1 = \frac{c}{2L} \quad (3.6)$$

El segundo armónico tiene lugar cuando en el interior del tubo se producen dos nodos (Fig. 3.8).

Entre cada dos vientres consecutivos habrá  $\lambda/2$ , luego  $2\lambda/2 = L$ , de donde  $\lambda = 2L/2$  y la frecuencia  $f_2$  será entonces:

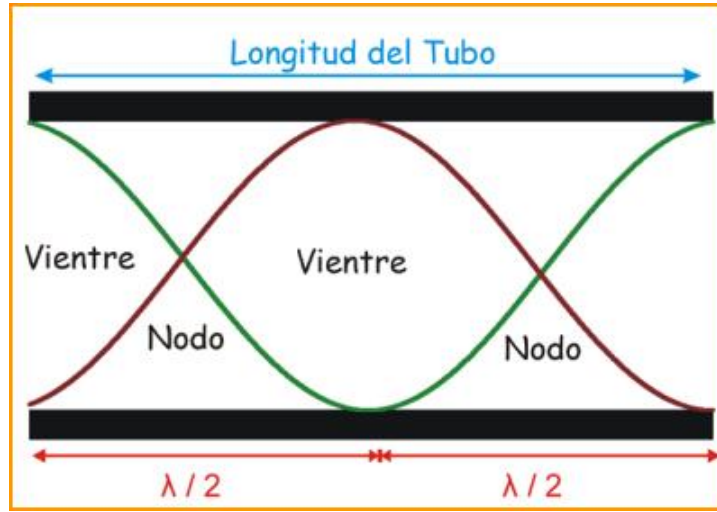


Figura 3.8: *Tubo Abierto produciendo su segundo armónico*

$$f_2 = \frac{c}{2L/2} = \frac{2c}{2L} \quad (3.7)$$

Pero como  $f_1 = \frac{c}{2L}$ , la ecuación 3.7 se puede escribir de esta forma:

$$f_2 = 2f_1 \quad (3.8)$$

De todo esto podemos deducir que la frecuencia del armónico de grado  $n$ ,  $f_n$ , será

$$f_n = nf_1 \quad (3.9)$$

Por lo tanto en un tubo abierto de longitud  $L$ , se pueden producir teóricamente, un sonido fundamental  $f_1 = \frac{c}{2L}$  y todos los armónicos de dicho sonido fundamental de frecuencias  $2f_1$ ,  $3f_1$ ,  $4f_1$ ,  $\dots$   $nf_1$  (Fig. 3.9).

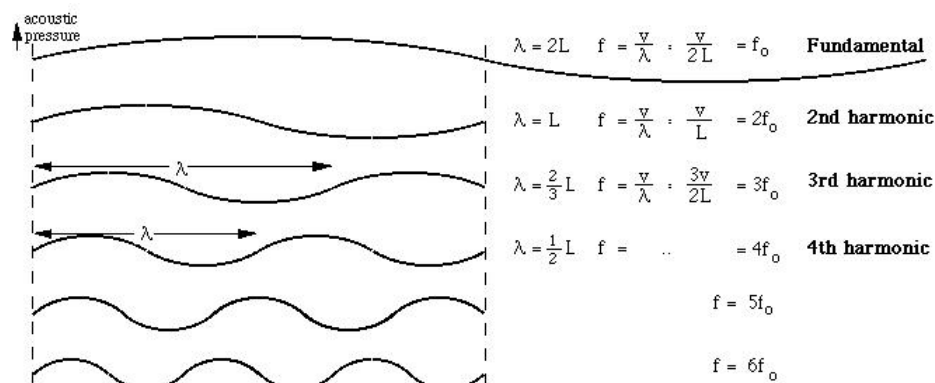


Figura 3.9: Armónicos de un sonido fundamental

### 3.4. Timbre de la Trompa

En la trompa, como en el resto de instrumentos de viento metal, el sonido es producido por la vibración de los labios que actúan como si fueran una caña de doble lengüeta. Para producir esta vibración es necesaria una cierta cantidad de energía. Esta será producida por el aire del instrumentista, o más exactamente por la presión intrapulmonar. Es en efecto, esta presión, de lo que dependerá la cantidad de energía suministrada.

Cuando el trompista aplica los labios tensados sobre la boquilla del instrumento, inicialmente el aire no puede salir, pero un incremento de presión proporcionado por el intérprete fuerza la separación de los labios y el paso de un impulso de aire a través de ambos. Debido a su elasticidad, los labios vuelven a juntarse interrumpiendo el paso del aire, para volver a reiniciar el ciclo una y otra vez con regularidad, produciendo de esta forma oscilaciones en la columna de aire (Fig. 3.10).

El sonido de la trompa, producido por la vibración de los labios, va propagándose a través de ésta, bajo la forma de una onda sinusoidal. Esta onda va a reflejarse sobre las paredes del tubo y las proporciones de éste van a determinar en gran parte la altura, la intensidad y el timbre del sonido.

La altura del sonido está determinada por la frecuencia. Si la frecuencia de vibración de los labios aumenta, el sonido se vuelve más agudo. Si disminuye, se volverá más grave.

La intensidad del sonido está determinada por la amplitud de la vibración. Una vibración más amplia de los labios conduce a un sonido fuerte. Una vibración menos amplia a un sonido

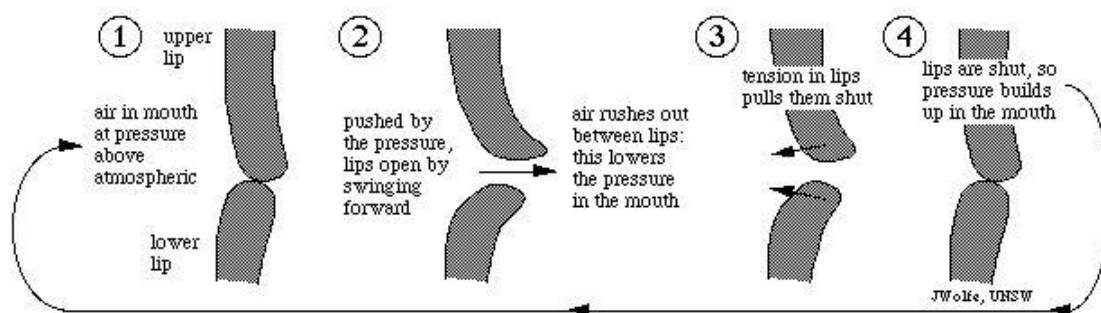


Figura 3.10: *Vibraciones de los labios del trompista*

piano.

El timbre está determinado a la vez por las proporciones del instrumento y por el material empleado. Está condicionada en gran parte, también por la boquilla empleada y evidentemente por el propio instrumentista.

El intérprete ejerce un gran efecto sobre la producción del sonido de un instrumento, modificando de manera notable su eficacia acústica. Los labios del músico, los dientes, la lengua, la cavidad bucal y la garganta influyen también directamente sobre el sonido, sean cuales fueren las características físicas del propio instrumento. El cambio de posición de la lengua afecta también al timbre, o color, de las notas que emiten los instrumentos de metal. El número de sobretonos o parciales aumenta cuando se baja la lengua a la posición de la primera vocal (aumentándose el volumen de resonancia de la boca), y disminuye cuando se arquea la lengua hasta la posición de la tercera vocal (lo que reduce el volumen de resonancia de la boca). Si el volumen de la boca es grande (con la lengua bajada) el sonido aparece lleno y brillante, con gran riqueza de sobretonos y muy poco ruido, producto de la intensa vibración y el gran desplazamiento de los labios. Cuando disminuye el volumen de la boca, al elevar la lengua, el sonido resulta más áspero, de desagradable color nasal.

### 3.4.1. Materiales

Si en el pasado, los fabricantes emplearon una gran variedad de materiales desde el cobre a la plata, la mayoría de los fabricantes actuales hacen uso de tres aleaciones: el cobre amarillo, el cobre rojo llamado también cobre de oro o gold messing y la alpaca.

Estas tres aleaciones poseen diferentes densidades. Un mismo instrumentista puede conseguir



diferentes timbres y la diferencia será igualmente perceptible a nivel de emisiones.

El material más utilizado es el latón. Es una mezcla de cobre y zinc (en proporciones variables) y otros tipos de metales en pequeñas cantidades ya que resiste muy bien la oxidación. Normalmente el latón suele tener entre un 60-70 de cobre y tiene un color amarillo brillante (muy parecido al oro). Dependiendo del porcentaje de cobre utilizado, se consiguen dos tipos de materiales, “amarillo” (menos concentración de cobre) y “oro messing” (más concentración de cobre). El latón también tiene una propiedad muy interesante: es antimicrobiano, característica fundamental en instrumentos de viento-metal, en los que el instrumentista está en contacto directo con el instrumento a través de la boca.

Así mismo, para la fabricación de trompas, se utiliza también la alpaca, que es una mezcla de cobre, cinc y níquel.

Es en el matiz fuerte donde la diferencia será más sensible:

- Con un metal amarillo, se llegará fácilmente al punto de ruptura donde el timbre cambia, donde se satura el sonido y suena metálico.
- Con el metal rojo, más rico en cobre, este punto se desplaza a un matiz superior.
- Con el metal blanco (alpaca) será prácticamente imposible llegar a este punto de ruptura.

Este fenómeno puede ser percibido como una ventaja para unos y un inconveniente para otros. Un instrumento nuevo parece a menudo tener emisiones más difíciles y un sonido duro, hasta agresivo. Como hemos visto antes, mientras tocamos, las ondas se desplazan por el interior del tubo. Este, está sometido a una alternancia de presiones y de depresiones. Cuando el instrumento es nuevo, el grado de pulimento en el interior del tubo es variable y las minúsculas rugosidades que lo tapizan, constituyen una pérdida de energía. Cuando el instrumento es usado durante un tiempo se produce un ligero depósito y, por consiguiente, los ataques se vuelven más dulces y el sonido parece redondearse.

A pesar de todo, es necesario limpiar periódicamente el interior del instrumento y particularmente del tudel, un depósito demasiado grande correría el riesgo de perturbar la velocidad de propagación del sonido y a veces notamos que ciertas notas son difíciles de tocar.

Por otra parte, parece cierto que el instrumentista va a fraguar el instrumento, y darle la sonoridad que él desea, por su manera particular de tocar, de emitir un sonido, y de conducirlo.

Es por esto por lo que, a menudo, intuitivamente muchos trompistas son reacios a dejar su instrumento, incluso por corto instante con el justo hecho de no encontrar enseguida ni la misma facilidad de emisión, ni la misma sonoridad e incluso afinación.

Podemos preguntarnos igualmente sobre la elección del lacado, del pabellón desmontable o de la llave del agua. Estos perfeccionamientos dan innegables servicios por la limpieza y el lado visual, el transporte y la eliminación rápida del agua. El lacado cambia la naturaleza del metal solamente por su peso. El lacado se creía no importante en cuanto a la sonoridad, pero es cierto que un mismo instrumento lacado o no da una sonoridad muy diferente, ya que amortigua los armónicos agudos, produciendo un sonido más centrado, es decir, acústicamente más oscuro.

En cuanto al pabellón desmontable, de reciente invención, muchas teorías se enfrentan. Lo último es que la rosca refuerza los armónicos agudos. En realidad la influencia de la rosca depende del lugar preciso donde se ponga.

Es el mismo caso para la llave del agua que puede jugar un nefasto papel si se sitúa sobre un vientre de presión. Es por esto por lo que cuando un instrumento no posee una llave para el agua de origen, es preferible que sea instalada por un acústico experto.

### 3.4.2. La Boquilla

Si la elección del instrumento es importante, la boquilla no lo es menos. Cuando tocamos, está claro que los tres elementos que son: instrumento, la boquilla y los labios del instrumentista deben formar una perfecta simbiosis.

La boquilla de la trompa se distingue totalmente de las de otros instrumentos por su conicidad. La forma de la cubeta o del cazo condiciona el timbre. Cuanto más cerca estén los labios del granillo (parte alta de la cubeta) más brillante será el sonido.

Claramente la calidad del sonido depende de las disposiciones anatómicas de cada uno, de la manera de soplar, de la presión y de la posición de apertura de los resonadores situados detrás de los labios: la faringe, la laringe, la boca, las fosas nasales. Hay una cierta analogía entre instrumentos de viento y la voz humana. El sistema fonador humano presenta muchas similitudes con la boquilla. En efecto, las cuerdas vocales son en realidad dos protuberancias que vibran como los labios, oponiendo, por su tensión, una resistencia a la presión intrapulmonar.

Igualmente útil es saber que los resonadores favorecen ciertas frecuencias. Pues el mismo instrumento, con la misma boquilla tocada por dos instrumentistas podrá parecer muy bueno

para uno y mediocre para el otro.

La facilidad de emisión está condicionada por el sistema acústico completo: labios, boquilla, instrumento y sala. La sala del concierto o de estudio es evidentemente la prolongación del instrumento.

Por todo ello, muchos trompista cambian frecuentemente de boquilla, según el día, la forma o la obra a interpretar.

### 3.4.3. La Campana

Veamos ahora un elemento acústico muy importante para el trompista, la mano derecha. Tradicionalmente situada en el pabellón, es el prolongador acústico del instrumento. Su posición influye sobre la afinación, también sobre el timbre y el color del sonido. Es pues necesario que el sonido pueda reflejarse sin, no obstante, perder su claridad y su intensidad. Esta buena posición es indispensable para la ejecución de sonidos “tapados” y el sonido “en eco” (bouché).

En el sonido tapado, la mano está metida profundamente en el pabellón: la longitud del tubo se acorta. Si para la trompa en Fa esta disminución es exactamente medio tono, para la trompa en Sib dependerá de la nota a ejecutar el registro. Para una buena afinación es necesario tocar los sonidos tapados en Fa y transportar medio tono bajo.

El sonido “eco” es una práctica utilizada al principio del siglo por los trompistas franceses. Compositores como Debussy, Charpentier o Dukas lo han empleado frecuentemente. Llamado también sonido velado o semitapado, procede de la técnica que se utilizaba para tocar con la trompa natural.

En el sonido semitapado, la mano derecha funciona como una sordina, la longitud del instrumento se encuentra alargada y el instrumentista debe transportar entonces medio tono más alto.



# Capítulo 4

## Análisis Espectral del Timbre de la Trompa

En este capítulo se estudiará el timbre de la trompa a través del análisis espectral de su señal acústica, mediante la utilización de dos herramientas: La **Transformada de Fourier Localizada (*STFT*)** y la herramienta en el lenguaje de programación Matlab *Timbre Toolbox*, con el objetivo de obtener una serie de conclusiones de acuerdo con los conceptos tímbricos desde el punto de vista del oído experto de un trompista.

### 4.1. Introducción

Para realizar el análisis espectral de la trompa se ha creado una base datos de grabaciones del registro sonoro correspondiente a nueve trompas dobles de diferentes marcas, modelos y materiales de fabricación. En la tabla 4.1 se enumeran todas ellas indicando sus principales características:

Para la adquisición de datos y su posterior grabación se utilizaron los siguientes equipos:

- Micrófono de membrana Speedlink Startlet (SL-4470-SBK-02//Vers. 1.0)
- Conversor A/D 2 canales con USB I/F (AK5371)
- Ordenador Intel Core 2 Duo 2.4 GHz y 4 Gb RAM
- Sonómetro
- Afinador

Tabla 4.1: Listado de las trompas utilizadas

Marca/Modelo	Nº Serie	Año fabricación
Alexander 103 Amarilla	24898	2008
Alexander 103 Oro Messing	21070	2005
Alexander 103 Sin Lacar	23810	2007
Alexander 104	1407	Más de 30 años
Durk D03	208	2006
Durk D04	185	2006
Pleischl	32	2005
Schmid	25003	2005
Yamaha 667D	2829	2000

Cabe destacar que todas las grabaciones se realizaron por una misma persona, dado que el timbre de un instrumento además de depender del propio instrumento, depende en gran medida del intérprete que lo ejecute. Todas las grabaciones se realizaron en la misma sala, ya que, como se explicó en la sección 3.2.2, las reflexiones del sonido en las paredes, techo y suelo del recinto influyen notablemente en su timbre. En este proyecto las grabaciones se realizaron en una cabina de estudio del Real Conservatorio Superior de Música de Madrid.

Para medir la intensidad del sonido se utilizó un sonómetro, cuya unidad de medida es el decibelio. Con el objetivo de realizar un análisis espectral adecuado, se garantizó:

- igualdad tímbrica: dado que el timbre depende de la intensidad, se eligió una intensidad alrededor de 100 dB.
- igualdad en la afinación: utilizando un afinador se minimizaron las variaciones de frecuencia.

En la tabla 4.2 se relaciona cada nota grabada con su frecuencia correspondiente en Hz.

Tabla 4.2: Notas grabadas y sus correspondientes frecuencias

NOTA	Fa3	Sol3	Do4	Re4	Mi4	Sib4
FRECUENCIA (Hz)	235	264	353	395	440	620

Las notas seleccionadas cubren sonidos en varios registros (medio y agudo), ya que el timbre de un instrumento varía a lo largo de su tesitura (Sección 3.2.2); y además, de modo que se

utilizaran casi todos los cilindros de la trompa, ya que dependiendo de qué cilindro se active se está añadiendo más o menos longitud a la trompa y puede haber pequeñas variaciones en el timbre.

En total, el número de ficheros de audio es de 54 (seis notas grabadas con las nueve trompas consideradas).

La señal acústica analógica de cada trompa se digitalizó mediante un conversor A/D. Sobre el conjunto de señales digitales se realizó el análisis espectral utilizando la herramienta de procesamiento Matlab.

A continuación se explica brevemente las herramientas utilizadas para el análisis espectral:

## 4.2. Transformada de Fourier Localizada (STFT)

### 4.2.1. Introducción

Se conoce como Transformada de Fourier Localizada (STFT - *Short Time Fourier Transform*) a la transformada discreta de Fourier (DFT) realizada sobre ventanas de la señal de duración corta [5].

Sea una señal  $x[n]$  de la que se quiere determinar su espectro en frecuencia variable en el tiempo. Entonces, para cada tiempo  $\ell$  se multiplica la señal por una ventana  $w[n]$  de longitud  $N$  y se realiza la DFT (Fig. 4.1), que habitualmente se implementa mediante la Transformada Rápida de Fourier (FFT - *Fast Fourier Transform*).

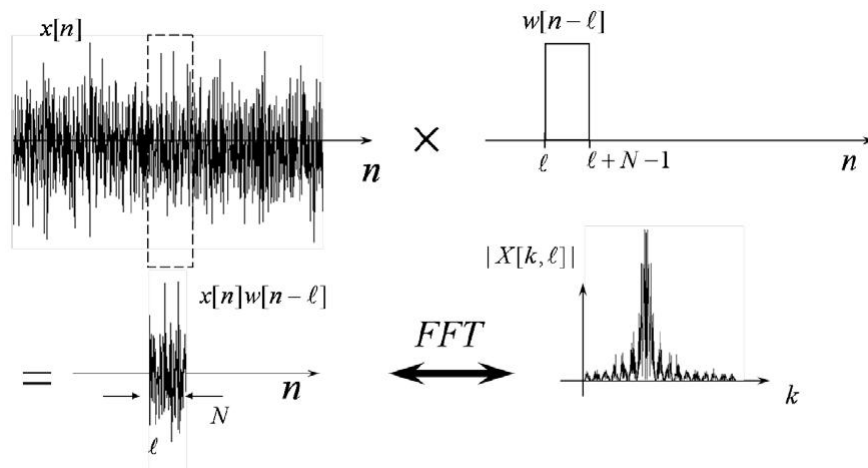


Figura 4.1: STFT como una FFT con ventana de solapamiento. Tomada de [5]

En otras palabras, la STFT se puede definir como:

$$X[k, l] = DFT[x[l]w[0], \dots, x[l + N - 1]w[N - 1]], \quad k = 0, \dots, N - 1 \quad (4.1)$$

donde  $k$  representa la frecuencia y  $l$  el tiempo. Sabiendo que el índice  $k$  está asociado a la frecuencia  $kF_s/N$ , con  $F_s$  la frecuencia de muestreo, se puede decir que  $X[k, l]$  representa la magnitud y la fase de la frecuencia  $F = kF_s/N$  en el instante  $t = lT_s$ , siendo  $T_s = 1/F_s$  el intervalo de muestreo.

Normalmente lo que interesa es la magnitud  $|X[k, l]|$  de la STFT. Ya que  $|X[k, l]|$  es una función de dos variables (índices de tiempo y frecuencia), su representación es tridimensional y, a menudo, es representada como una imagen asociando un valor de color o escala de grises con su nivel de intensidad.

Es importante tener en cuenta que existen diferencias entre lo que idealmente se espera ver en la STFT y lo que en la práctica se ve. Debido a que la STFT es básicamente una aplicación de la DFT, presenta las mismas limitaciones asociadas a las discontinuidades en los bordes de la ventana de análisis, las cuales producen esparcimiento de ruido en el resto del espectro. En la figura 4.2 se muestra la STFT ideal de una señal compuesta de dos señales periódicas.

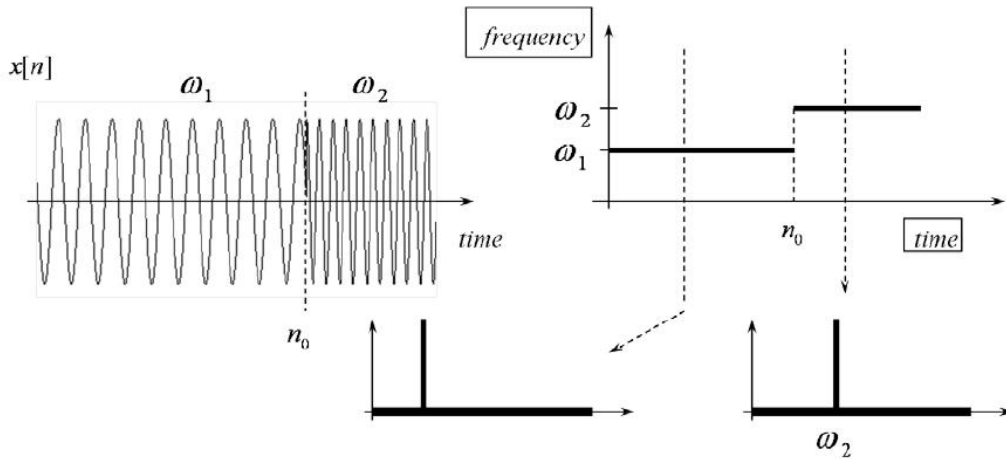


Figura 4.2: *STFT ideal. Tomada de [5]*

En este ejemplo se observa una señal con dos sinusoides, una de frecuencia  $\omega_1$  para el tiempo  $n \leq n_0$  y otra de frecuencia  $\omega_2$  para el tiempo  $n > n_0$ . La representación tiempo-frecuencia ideal debería ser como se muestra en la figura 4.2, cero, excepto para las frecuencias  $\omega = \omega_1, \omega_2$  en sus respectivos intervalos de tiempo. Esto produciría una resolución perfecta en la frecuencia,



ya que sólo se vería la frecuencia exacta, y una resolución perfecta en el tiempo, ya que se vería exactamente cuándo cambia la frecuencia.

En la práctica no se consigue esto. Al igual que con la DFT, el hecho de que se utilice una ventana de longitud  $N$  afecta a la resolución en frecuencia: cuanto mayor es la ventana  $N$ , mejor se pueden diferenciar dos frecuencias adyacentes, es decir, se obtiene mejor resolución en frecuencia. Sin embargo, obtener una mayor resolución en el tiempo requiere una longitud de ventana  $N$  menor. Esto se llama “*Principio de Incertidumbre*” en procesamiento de señales, ya que no se puede resolver al mismo tiempo una señal en tiempo y en frecuencia y, por lo tanto, existe un compromiso entre resolución en frecuencia y la resolución en tiempo.

#### 4.2.2. El Espectrograma

La representación de la magnitud de la STFT se llama espectrograma y muestra la evolución de las frecuencias en el tiempo [12].

De la sección anterior, se sabe que la DFT presenta limitaciones debido a la longitud de la ventana finita, entonces el espectrograma real (no ideal) será como se muestra en la figura 4.3.

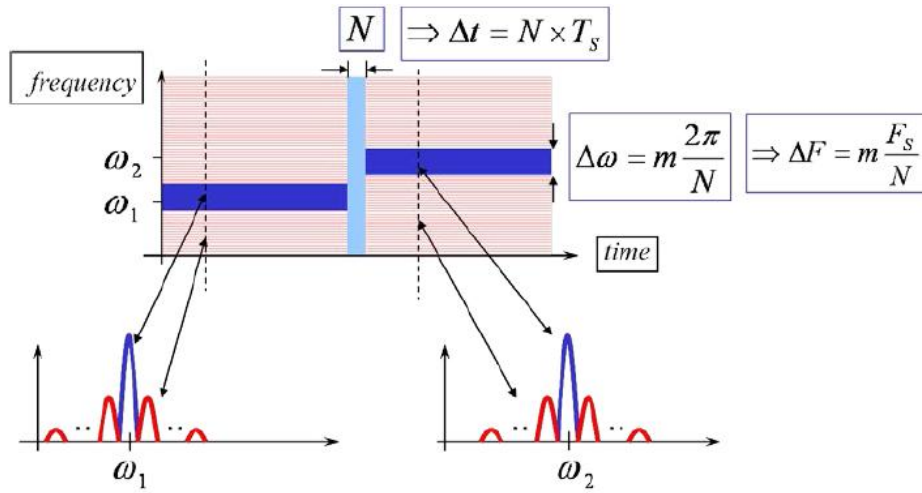


Figura 4.3: *Espectrograma Real*

En la figura 4.3 se muestran dos secciones transversales de la representación tridimensional (espectrograma). Cada muestra representa la magnitud de la DFT en términos del lóbulo principal y los lóbulos laterales para cada componente de frecuencia. Se aprecia que la anchura del lóbulo principal define la resolución en frecuencia, de modo que:

$$\Delta\omega = m \frac{2\pi}{N} \quad (4.2)$$

con el coeficiente  $m$  dependiendo de la ventana utilizada. Para una ventana rectangular es  $m = 2$ , mientras que en una Hamming, Hanning y Bartlett es  $m = 4$ .

La resolución en frecuencia será de la forma:

$$\Delta F = m \frac{F_s}{N} \quad (4.3)$$

siendo  $F_s$  la frecuencia de muestreo. La resolución en el tiempo viene dada por la longitud de la ventana  $N$  y, por lo tanto, está dada por:

$$\Delta T = NT_s \quad (4.4)$$

La ventana rectangular corresponde a lo que se obtendría si se truncasen los datos, mientras que las otras ventanas proporcionan una cierta ponderación de los mismos. A partir de sus efectos sobre los espectros de frecuencia, se puede observar que la ventaja de usar una ventana distinta de la cuadrada es la de tener lóbulos laterales inferiores. Sin embargo, la desventaja es una pérdida en la resolución de frecuencia, a partir de  $\Delta\omega = \frac{4\pi}{N}$  para la ventana rectangular,  $\Delta\omega = \frac{8\pi}{N}$  y  $\Delta\omega = \frac{16\pi}{N}$  para las ventanas Hamming y Blackman respectivamente (ver Fig. 4.4).

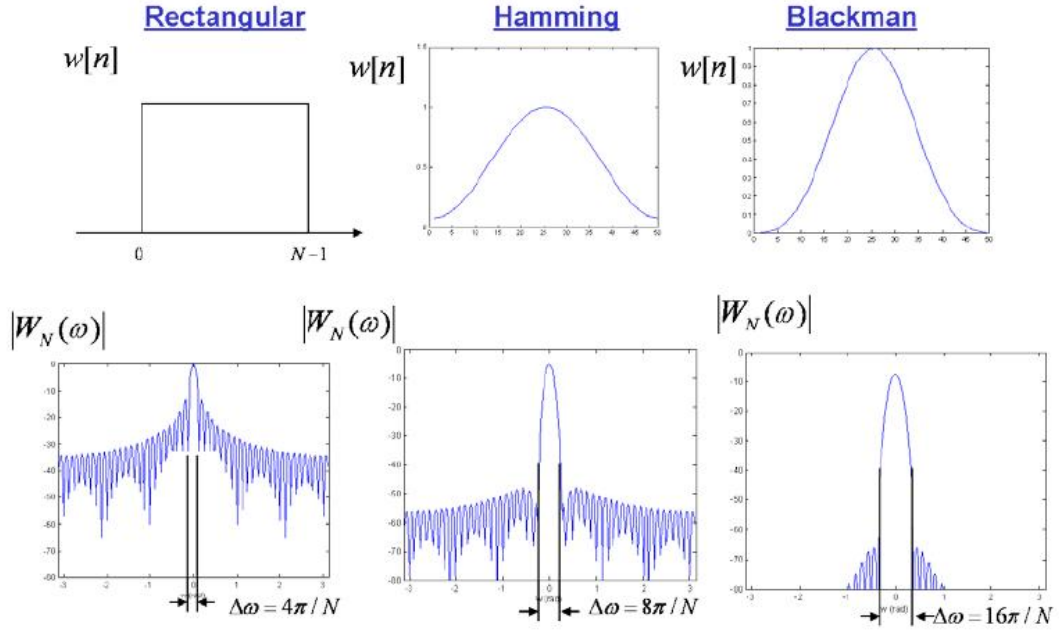


Figura 4.4: Ventanas de solapamiento más utilizadas y su espectro en frecuencia

#### 4.2.3. Aplicación de la STFT en el estudio del timbre de la trompa

Para estudiar el timbre de la trompa es necesario determinar su espectro en frecuencia variable en el tiempo para posteriormente analizarlo. Para ello, se ha utilizado la Transformada de Fourier Localizada como herramienta para obtener el espectrograma y el espectro en frecuencias de cada señal acústica de la base de datos.

Se ha utilizado la función de Matlab *spectrogram*, que calcula el espectrograma de la señal de audio usando la Transformada de Fourier Localizada:

$$[S, F, T] = \text{spectrogram}(x, \text{window}, \text{noverlap}, \text{NFFT}, F_s)$$

donde:

- $S$  es la matriz con los valores del espectrograma
- $F$  es el vector de frecuencias del espectrograma
- $T$  es el vector de tiempos del espectrograma

- $x$  es la señal de audio de la que se quiere obtener el espectrograma
- $window$  es el tamaño de la ventana de análisis, en nuestro caso de 40 ms y de tipo Hamming
- $noverlap$  es el solape entre ventanas de análisis, en nuestro caso de 10 ms
- $NFFT$  es el número de puntos de frecuencia usados para calcular la Transformada Discreta de Fourier (DFT), en nuestro caso de valor 1024
- $Fs$  es la frecuencia de muestreo, en nuestro caso de 22050 Hz

Al representar el logaritmo del módulo de la matriz  $S$  (obtenida de la función *spectrogram* de Matlab) para la nota Fa3 ejecutada por la trompa Alexander 103 Amarilla (Fig. 4.5), se observa que la energía de la señal está repartida entre toda la serie armónica (la escala de colores va del rojo oscuro, armónicos con más energía; al amarillo, armónicos con menos energía).

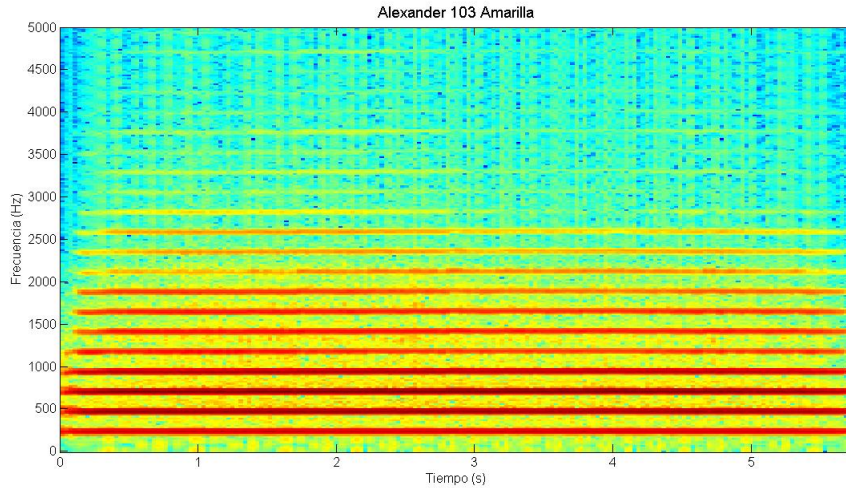


Figura 4.5: *Espectrograma para la nota Fa3 ejecutada por la trompa Alexander 103 Amarilla*

La frecuencia correspondiente a la nota Fa3 es de 235 Hz, como se ha explicado en la introducción de este capítulo (4.1), eso quiere decir que la frecuencia fundamental (1<sup>o</sup> armónico) de la señal acústica correspondiente a esa nota es de 235 Hz y que el resto de armónicos tienen frecuencias múltiplos de esta fundamental (Tabla 4.3).

Tabla 4.3: Frecuencias de la serie armónica para la nota Fa3

Nº ARMÓNICO	FRECUENCIA (Hz)	
Fundamental	$f$	235
2º	$2f$	470
3º	$3f$	705
4º	$4f$	940
...	...	...
16º	$16f$	3760

Esto se demuestra observando de nuevo el espectrograma de la figura 4.6.

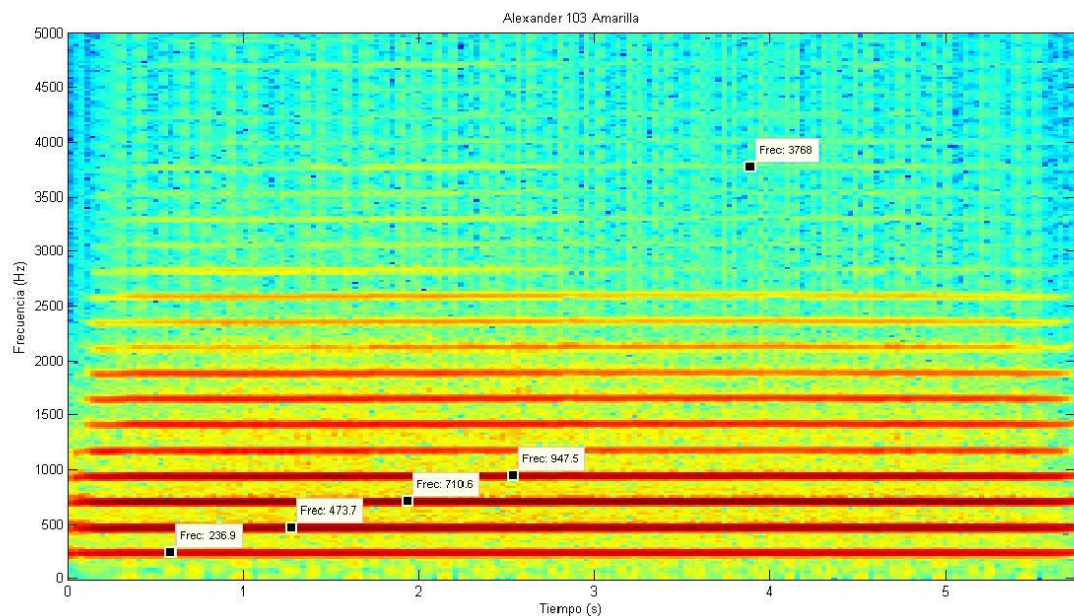


Figura 4.6: Espectrograma para la nota Fa3 ejecutada por la trompa Alexander 103 Amarilla con la frecuencia de los armónicos 1,2,3,4 y 16

Para el estudio del timbre de la trompa también se ha analizado el **espectro en frecuencia** de las señales de audio de la base de datos, que representa las señales en el dominio de la frecuencia. Para ello, se ha utilizado también la Transformada de Fourier Localizada, ya que el espectro en frecuencia es la representación del espectrograma en un determinado instante de tiempo. En este caso, se ha elegido el punto medio de la señal, ya que en ese punto la señal se

encuentra en la fase de sostenimiento, donde la intensidad no varía prácticamente nada (como se explicó en la sección 3.2.2).

En la figura 4.7 se representa el espectro en frecuencia de la señal en su punto medio, correspondiente a la nota Fa3 ejecutada por la trompa Alexander 103 Amarilla.

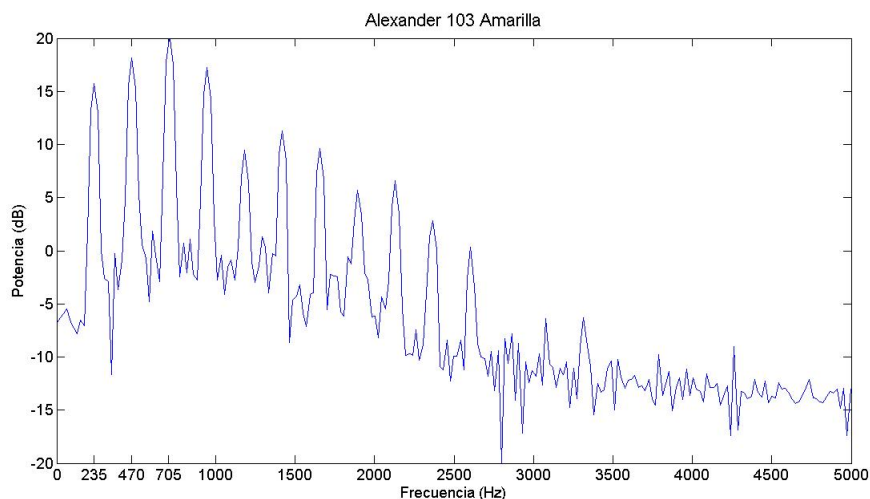


Figura 4.7: *Espectro en frecuencia para la nota Fa3 ejecutada por la trompa Alexander 103 Amarilla*

Se observa que los picos de la señal se corresponden con los armónicos, encontrándose el primer armónico (fundamental) aproximadamente en la frecuencia 235 Hz, el segundo armónico en 470 Hz, el tercero en 705 Hz y así sucesivamente...

### 4.3. Cálculo de Armónicos (*Timbre Toolbox*)

#### 4.3.1. Introducción

La herramienta de Matlab *Timbre Toolbox* [13] proporciona un amplio conjunto de descriptores de audio de señales musicales con el objetivo de caracterizar el timbre de un conjunto amplio de sonidos. Estos descriptores son útiles para el análisis de voz, percepción de timbres musicales, clasificación de instrumentos musicales o para la recuperación de información musical.

Esta herramienta también lleva a cabo un análisis de la redundancia de la información de todo el conjunto de descriptores de audio, a fin de que los investigadores puedan seleccionar sistemáticamente descriptores independientes para sus análisis. La *Timbre Toolbox*, está escrita

en el lenguaje de programación MATLAB y tiene como objetivo proporcionar una herramienta única para la investigación de audio y acústica musical.

A pesar de las múltiples utilidades de la *Timbre Toolbox*, para este proyecto solamente se ha utilizado la parte relacionada con el cálculo de las componentes de los armónicos de una señal de audio, que se explica en el siguiente apartado.

#### 4.3.2. Parciales armónicos sinusoidales (Armónicos)

Una señal de audio puede ser representada como una suma de componentes sinusoidales (o parciales) con una variación lenta en la frecuencia y en la amplitud [9] y [16]:

$$s(t_n) \cong \sum_{h=1}^H a_h(t_n) \cos(2\pi f_h(t_n) + \phi_{h,0}(t_n)), \quad (4.5)$$

donde  $a_h(t_n)$ ,  $f_h(t_n)$  y  $\phi_{h,0}(t_n)$  son la amplitud, frecuencia y la fase inicial del parcial  $h$  en el instante de tiempo  $t_n$ , siendo  $t_n = n/Fr$  el tiempo expresado en segundos, donde  $n \in N^+$  es el número de trama y  $Fr$  la tasa de muestreo. Suponiendo una variación lenta en la amplitud y la frecuencia,  $a_h(t_n)$  y  $f_h(t_n)$  son señales paso bajo que se pueden estimar usando el análisis de tramas:  $a_h(t_m)$  y  $f_h(t_m)$ . Para ello, se utiliza una ventana Blackman de 100 ms de duración y un tamaño de salto de 25 ms. Cabe señalar que esta longitud de ventana es mayor que la utilizada para el cálculo de la STFT. El motivo es obtener una mejor resolución espectral (separación entre picos espectrales adyacentes), con el fin de ser capaces de describir armónicos de forma individual y para calcular los descriptores de armónicos relacionados. En línea con [8] y [11], el número de parciales  $H$  está establecido en 20. Este valor representa un compromiso, ya que para una frecuencia fundamental de 50 Hz se cubre el rango de 20 a 1000 Hz y para una señal de 1000 Hz se cubre el rango de 1000-20000 Hz. Como este parámetro se puede cambiar fácilmente en la *Timbre Toolbox*, en este proyecto se ha establecido  $H$  en 16, ya que para este estudio este número de parciales es suficiente.

En este sistema, el modelo sinusoidal se utiliza para la estimación de descriptores de armónicos como el tricromático [14] o la relación armónica par-impar [2]. Estos descriptores requieren que se les asigne un orden y un número a los parciales (por ejemplo, tenemos que saber qué parciales se corresponden con los tres primeros armónicos y cuáles son los armónicos pares o impares). Por lo tanto hay que definir un parcial de referencia, así como la relación entre los parciales  $h$  y el parcial de referencia. Debido a esta limitación, no se puede usar un modelo sinusoidal ciego,



tal que uno que sólo estima parciales usando el seguimiento de parciales.

En este caso, se utiliza un modelo sinusoidal armónico extendido al caso inarmónico (como para los sonidos de un piano), es decir, los parciales  $f_h(t_m)$  son considerados como múltiplos de una frecuencia fundamental  $f_0(t_m)$  o como una deformación inarmónica de una serie armónica. Para ello, se define un coeficiente de inarmonía  $\alpha \geq 0$ . El contenido del espectro ahora se explica por parciales a frecuencias  $f_h(t_m) = f_0(t_m)h\sqrt{1 + \alpha h^2}$ . Con el fin de estimar el modelo, primero se calcula la frecuencia fundamental en cada trama  $t_m$ . En la implementación *Timbre Toolbox*, se utiliza el algoritmo propuesto por [4]. Dado que  $f_0(t_m)$  es una estimación, se permite una desviación del valor estimado, denotado como  $f_h(t_m) = (f_0(t_m) + \delta(t_m))h\sqrt{1 + \alpha h^2}$ . Para una trama  $t_m$  dada, se buscan entonces los mejores valores de  $\delta(t_m)$  y  $\alpha$  ( $\alpha$  se supone que es constante en todas las tramas) de tal manera que la energía del espectro se describe mejor. Por lo tanto, se buscan los valores de  $\delta(t_m)$  y  $\alpha$  con el fin de maximizar  $e_{t_m}(\delta, \alpha)$  definida como:

$$e_{t_m}(\delta, \alpha) = \sum_h X_{t_m}((f_0(t_m) + \delta(t_m))h\sqrt{1 + \alpha h^2}) \quad (4.6)$$

donde  $X_{t_m}(f)$  es la amplitud de la DFT a frecuencia  $f$  e instante de tiempo  $t_m$ .

#### 4.3.3. Aplicación de la *Timbre Toolbox* en el estudio del timbre de la trompa

Para llevar a cabo el análisis del timbre de la trompa por medio de la herramienta *Timbre Toolbox*, se ha utilizado la clase *cHarmRep* y en concreto la función *Harmonicextract*. Esta función calcula el conjunto de características del timbre de un lote de archivos de audio. Unas de ellas son las frecuencias y las amplitudes correspondientes a los armónicos de la señal.

Como se ha explicado en la sección anterior, para extraer las características de los armónicos de una señal se realiza un procesamiento por tramas, es decir, se calculan tanto las frecuencias como las amplitudes de los armónicos dividiendo la señal de audio en ventanas de análisis solapadas. De esta forma, para cada archivo de audio se obtiene una matriz de frecuencias y otra de amplitudes con dimensión número de armónicos por número de tramas ( $n_{arm} \times n_{tr}$ ).

En este proyecto, se ha calculado la media de dichas matrices de frecuencias y amplitudes para cada archivo de audio, obteniendo una matriz de frecuencias y otra de amplitudes de dimensión  $n_{arch} \times n_{arm}$ . Ya que para cada modelo de trompa se han grabado seis notas, el número total de archivos de audio que tiene la base de datos es de  $9 \times 6 = 54$ . Por lo tanto, las matrices de frecuencias y amplitudes tienen dimensión  $54 \times 16$ .



Como ejemplo de las matrices de frecuencias y amplitudes obtenidas, en las tablas 4.4 y 4.5 se muestran las frecuencias de los armónicos para la nota Fa3 ejecutada por la trompa Alexander 103 Amarilla y en las tablas 4.6 y 4.7 las amplitudes correspondientes.

Tabla 4.4: Frecuencias de los ocho primeros armónicos para la nota Fa3 ejecutada por la trompa Alexander 103 Amarilla

NºARM	1	2	3	4	5	6	7	8
FRECUENCIA (Hz)	235.63	471.08	706.72	942.26	1177.88	1413.41	1649.00	1884.53

Tabla 4.5: Frecuencias de los ocho últimos armónicos para la nota Fa3 ejecutada por la trompa Alexander 103 Amarilla

NºARM	9	10	11	12	13	14	15	16
FRECUENCIA (Hz)	2120.12	2355.67	2591.28	2826.82	3062.34	3297.92	3533.48	3769.09

Tabla 4.6: Amplitudes de los ocho primeros armónicos para la nota Fa3 ejecutada por la trompa Alexander 103 Amarilla

NºARM	1	2	3	4	5	6	7	8
AMPLITUD	0.1637	0.3263	0.4212	0.2391	0.0492	0.0608	0.0518	0.0293

Tabla 4.7: Amplitudes de los ocho últimos armónicos para la nota Fa3 ejecutada por la trompa Alexander 103 Amarilla

NºARM	9	10	11	12	13	14	15	16
AMPLITUD	0.0115	0.0085	0.0068	0.0018	0.0008	0.001	0.0007	0.0008

Se puede observar que los valores de frecuencia de los armónicos (tablas 4.4 y 4.5) coinciden con los de la tabla 4.3 de la sección anterior, teniendo el armónico fundamental una frecuencia de 235 Hz, el segundo una frecuencia de aproximadamente 470 Hz, etc.

También se pueden comparar los valores de las amplitudes de las tablas 4.6 y 4.7 con el espectro en frecuencia de la figura 4.7 para la nota Fa3 de la trompa Alexander 103 Amarilla, donde se observa que el armónico con más energía es el 3º, seguido del 2º y 1º, y que, por ejemplo, el 5º armónico tiene menos energía que el 6º de la serie armónica.

## 4.4. Análisis Espectral

Antes de comenzar con el análisis espectral es necesario realizar un **preprocesamiento de los datos** siguiendo los siguientes pasos:

1. Eliminación de la componente continua de la señal.
2. Normalización de la señal para unificar intensidades, aunque como se ha explicado anteriormente, en la toma de los datos se trató de que la intensidad para cada nota y cada trompa siempre fuera la misma por medio del sonómetro.
3. Eliminación del silencio al comienzo y final de la señal.

La figura 4.8 muestra un ejemplo de audio para la nota Do4 con la trompa Alexander 104 antes y después del preprocesado de la señal.

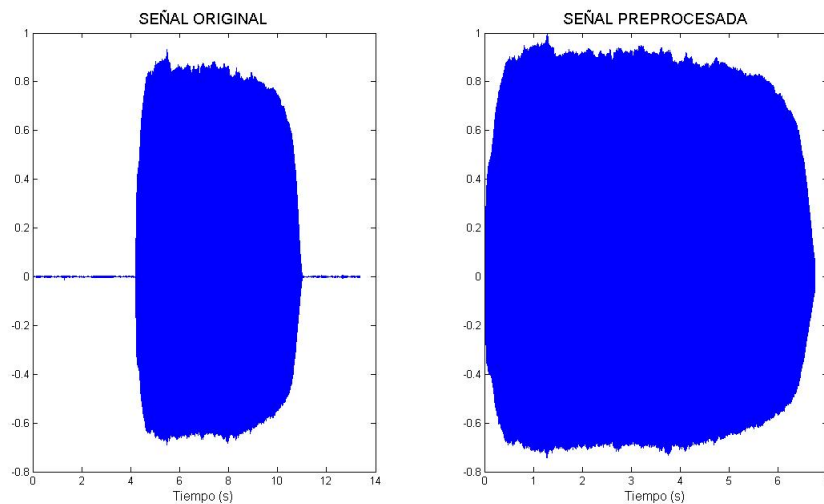


Figura 4.8: Señal original (izquierda) y señal preprocesada (derecha) para la nota Do4 para la trompa Alexander 104

El estudio del timbre de la trompa se ha llevado a cabo teniendo en cuenta:

- **El número de armónicos con energía significativa.** Se puede decir que cuanto mayor sea el número de armónicos que aparecen en el espectro de un sonido, más brillante, claro o metálico será su timbre.
- **Cómo esté repartida la energía en su serie armónica.** Dependiendo de qué armónico predomine en dicha serie el timbre del sonido será más profundo, redondo, cálido, o más nasal, áspero o disonante.

Este estudio se ha realizado mediante el análisis del **espectrograma** y **espectro**, junto con la **matriz de amplitudes** (obtenida a partir de la herramienta de Matlab *Timbre Toolbox*) de los armónicos para cada trompa y nota, clasificando las trompas en función de:

- El número de armónicos con energía significativa.
- La energía repartida en los ocho primeros armónicos de la serie.
- La energía repartida en los ocho últimos armónicos de la serie.
- La energía de los armónicos pares frente a la de los impares. En este caso se ha comparado el nivel de energía repartido en los armónicos pares de cada señal con su nivel de energía en los armónicos impares.

#### 4.4.1. Fa3

El estudio comienza por la nota más grave de las elegidas, *Fa3*. Para ejecutar esta nota no se utiliza ninguno de los tres cilindros de la trompa en Sib.

En las tablas 4.8 y 4.9 se puede ver la matriz de las amplitudes de los dieciséis primeros armónicos para cada modelo de trompa. Se observa, para todos los casos, que la energía va disminuyendo a medida que el índice de armónico aumenta (con algunas excepciones), teniendo los últimos armónicos de cada trompa apenas energía significativa.

Tabla 4.8: Matriz de Amplitudes de los ocho primeros armónicos para la nota Fa3 correspondientes a cada trompa

TROMPA/NºARM	1	2	3	4	5	6	7	8
<b>Alex. 103 Am</b>	0.1637	0.3263	0.4212	0.2391	0.0492	0.0608	0.0518	0.0293
<b>Alex.103 OM</b>	0.1364	0.2248	0.4797	0.1462	0.0402	0.0606	0.045	0.0119
<b>Alex. 103 SL</b>	0.1633	0.2876	0.4345	0.2153	0.0479	0.0193	0.0594	0.0348
<b>Alex. 104</b>	0.1263	0.3736	0.3759	0.1344	0.1102	0.016	0.0553	0.0242
<b>Durk D03</b>	0.1208	0.2601	0.3638	0.0331	0.0377	0.0235	0.0328	0.0244
<b>Durk D04</b>	0.1244	0.2986	0.3112	0.1793	0.022	0.0356	0.0395	0.0514
<b>Pleischl</b>	0.1326	0.22	0.3264	0.0406	0.0544	0.0291	0.0275	0.0202
<b>Schmid</b>	0.1634	0.2703	0.41	0.0391	0.0736	0.0333	0.0408	0.0215
<b>Yamaha 667D</b>	0.1374	0.3059	0.3402	0.1191	0.0689	0.0377	0.0358	0.0072

Tabla 4.9: Matriz de Amplitudes de los ocho últimos armónicos para la nota Fa3 correspondientes a cada trompa

TROMPA/NºARM	9	10	11	12	13	14	15	16
<b>Alex. 103 Am</b>	0.0115	0.0085	0.0068	0.0018	0.0008	0.001	0.0007	0.0008
<b>Alex. 103 OM</b>	0.0135	0.0042	0.0044	0.0014	0.0009	0.001	0.0009	0.0007
<b>Alex.103 SL</b>	0.0087	0.0096	0.0038	0.0018	0.001	0.0017	0.0011	0.0012
<b>Alex. 104</b>	0.0254	0.002	0.0063	0.0037	0.0022	0.0013	0.0007	0.0009
<b>Durk D03</b>	0.0041	0.0017	0.0009	0.0011	0.0006	0.0006	0.0005	0.0004
<b>Durk D04</b>	0.0167	0.008	0.0035	0.0025	0.0022	0.0022	0.0008	0.0011
<b>Pleischl</b>	0.0119	0.0055	0.0018	0.0019	0.0012	0.0016	0.0009	0.0006
<b>Schmid</b>	0.0104	0.0021	0.0015	0.0015	0.0008	0.0011	0.0008	0.0006
<b>Yamaha 667D</b>	0.0119	0.0026	0.0017	0.0009	0.0008	0.0011	0.0005	0.0005

Haciendo un análisis de la matriz de amplitudes de los armónicos, se obtiene un listado de las trompas ordenadas de mayor a menor número de armónicos con energía significativa a partir de un umbral de 0.0008 (Ver Tabla 5 en Apéndice A), donde se observa que la trompa con mayor número de componentes armónicas para la nota Fa3 es la *Durk D04* y la de menor número es la *Durk D03*.

En la figura 4.9 se presenta un gráfico en el que aparecen los espectrogramas de cada trompa

para la nota Fa3, donde se pueden apreciar las diferencias entre trompas en cuanto al número de armónicos relevantes. En estas gráficas la energía de las componentes armónicas sigue la gama de color del rojo oscuro (armónico con mayor energía) al amarillo (armónico con menor energía). Por lo tanto, la trompa con mayor número de armónicos será la correspondiente al espectrograma con mayor número de franjas de color.

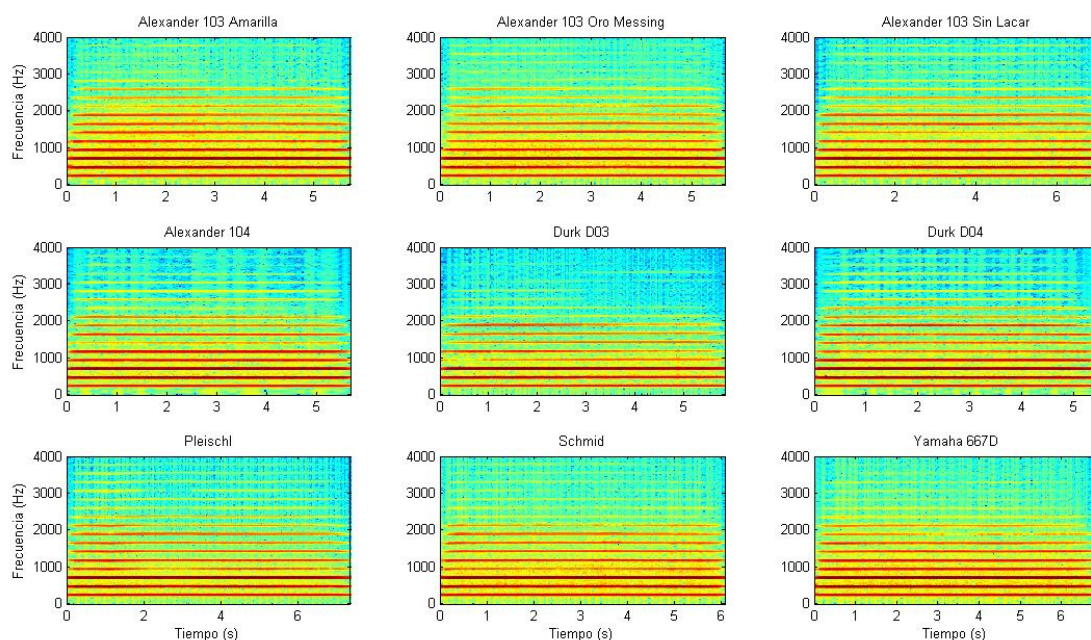


Figura 4.9: *Espectrograma de cada trompa para la nota Fa3*

Para ver mejor estas diferencias, en la figura 4.10 se muestran los espectrogramas para las trompas *Durk D04* (trompa con mayor número de armónicos) y *Durk D03* (trompa con menor número de armónicos), donde se observa que para la primera el espectrograma tiene más franjas de color que para la segunda.

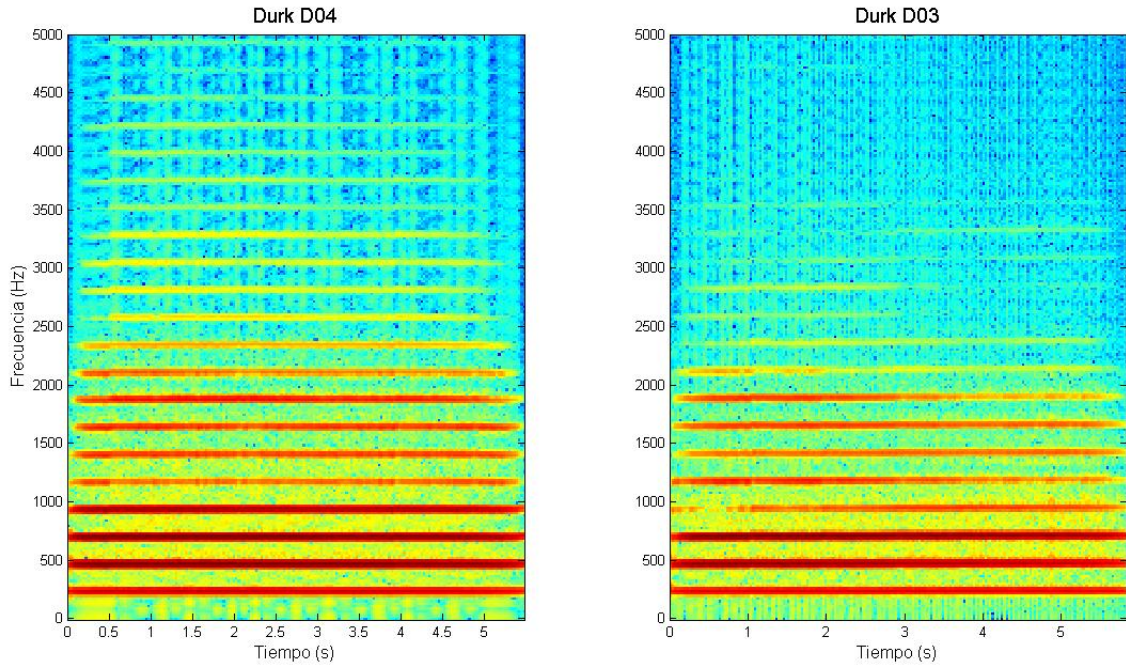


Figura 4.10: *Espectrogramas de las trompas Durk D04 y Durk D03 para la nota Fa3.*

Para seguir con el estudio espectral de las señales acústicas del conjunto de trompas para la nota Fa3, se vuelve a analizar la matriz de amplitudes con el fin de obtener un listado de las trompas (Ver Tabla 5 en Apéndice A) ordenadas según cómo esté distribuida la energía de la señal en:

- Los primeros ocho armónicos de la serie. La trompa con más energía en sus primeros ocho armónicos es la trompa *Alexander 103 Amarilla* y la que menos es la trompa *Pleischl*.
- Los últimos ocho armónicos de la serie. La trompa con más energía en sus últimos ocho armónicos es la trompa *Durk D04* y la que menos es la trompa *Yamaha 667D*.
- Los armónicos pares de la serie frente a los impares. La trompa, cuya energía está repartida en mayor medida en sus armónicos pares frente a sus armónicos impares, es la *Durk D04* y la que menos es la trompa *Pleischl*.
- Los armónicos impares de la serie frente a los pares. La trompa, cuya energía está repartida en mayor medida en sus armónicos impares frente a sus armónicos pares, es la *Yamaha 667D*.



y la que menos es la trompa *Alexander 104*.

Otra manera de analizar cómo está repartida la energía de una señal a lo largo de su serie armónica es observando su espectro en frecuencia. En la figura 4.11 están representados los espectros en frecuencia de todas las trompas para la señal de audio correspondiente a la nota Fa3.

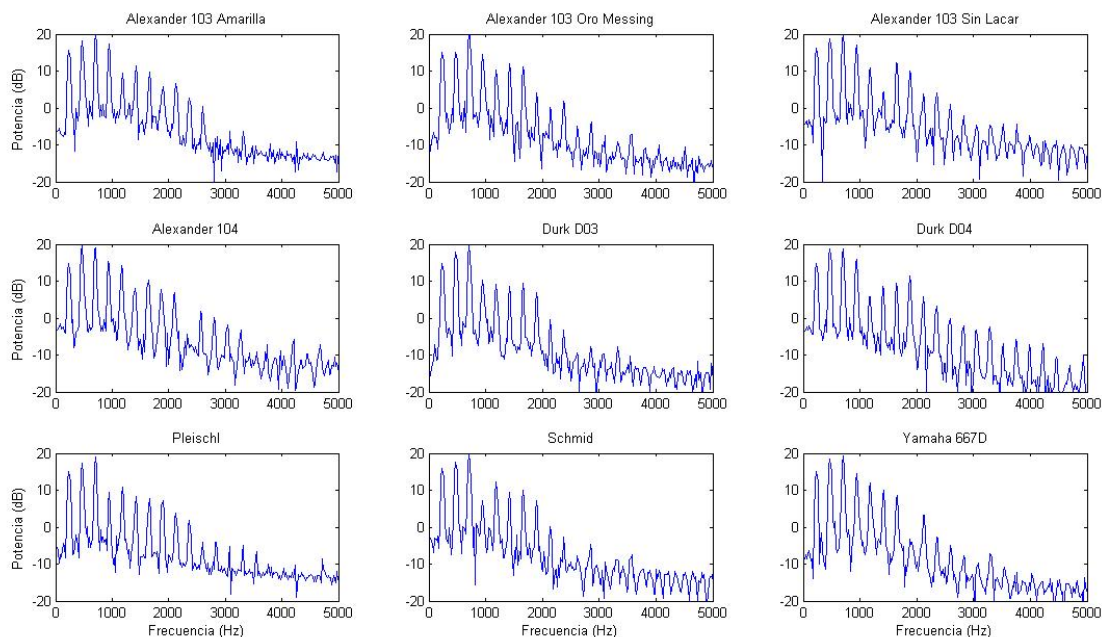


Figura 4.11: Espectro en frecuencia de cada trompa para la nota Fa3.

En la figura 4.11 se observa que todos los espectros siguen un mismo patrón en cuanto a manera de estar repartida la energía de la señal en sus armónicos: el armónico con más energía frente al resto es el **3º armónico**, seguido del **2º** y el **1º**, que demuestra que todos se corresponden con la nota Fa3. Este patrón se puede comprobar en las matrices de amplitudes (tablas 4.8 y 4.9). También se observa que un armónico determinado predomina más o menos en un espectro frente en el resto de espectros (por ejemplo, el armónico número cuatro en la trompa *Schmid* tiene un valor de energía bastante inferior que en el espectro del resto de trompas).

Se demuestra por medio de los espectros en frecuencia el análisis llevado a cabo con la matriz de amplitudes: trompas con mayor y menor número de armónicos (Fig.4.12), mayor y menor energía en sus primeros ocho armónicos (Fig. 4.13), en sus ocho últimos (Fig. 4.14) y energía

repartida en armónicos pares frente a la repartida en armónicos impares (Fig. 4.15).

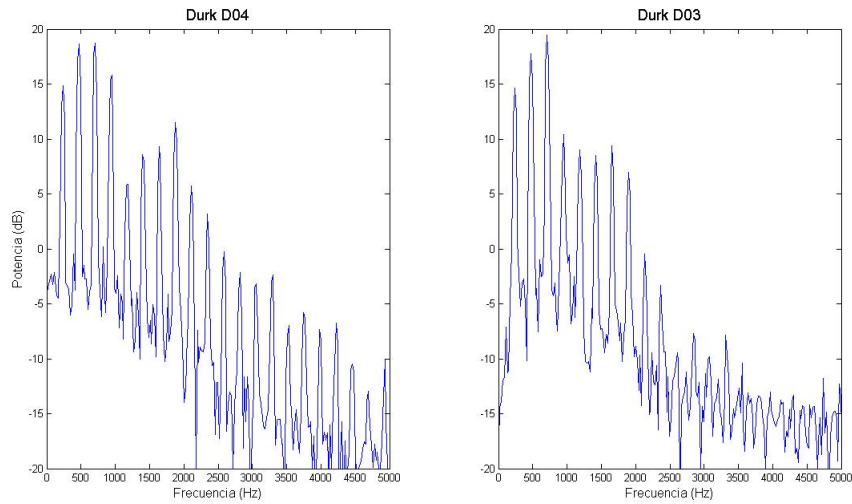


Figura 4.12: *Espectro de las trompas Durk D04 y Durk D03 para la nota Fa3, donde se compara el número de armónicos.*

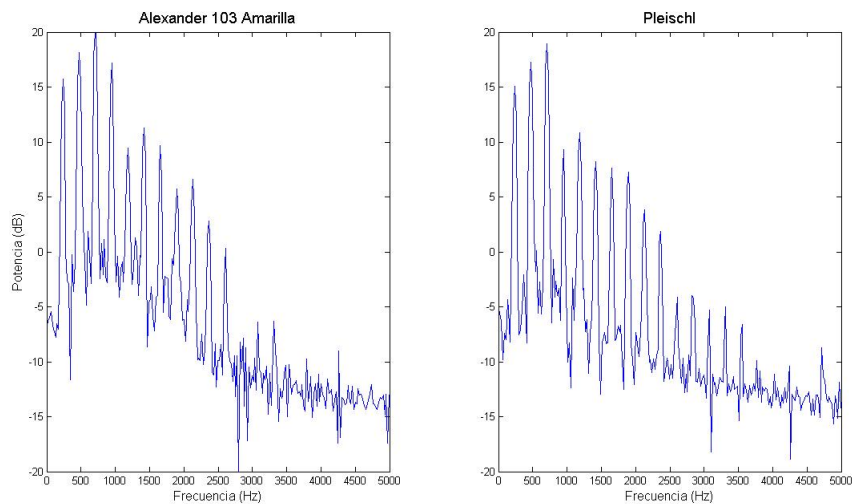


Figura 4.13: *Espectro de las trompas Alexander 103 Amarilla y Pleischl para la nota Fa3, donde se compara la energía repartida en los ocho primeros armónicos.*



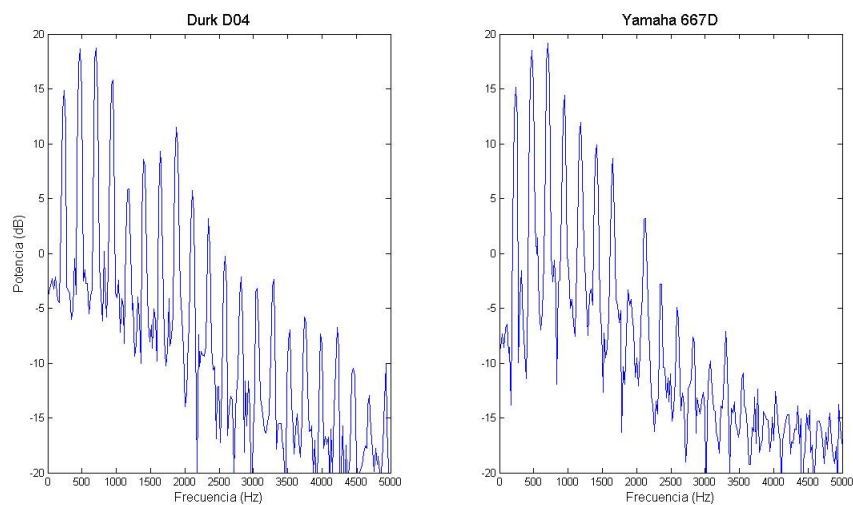


Figura 4.14: Espectro de las trompas Durk D04 y Yamaha 667D para la nota Fa3, donde se compara la energía repartida en los ocho últimos armónicos.

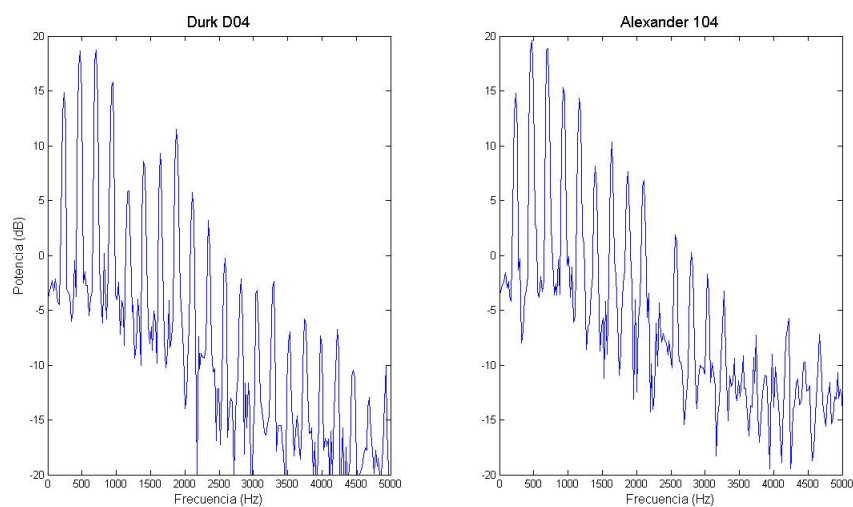


Figura 4.15: Espectro de las trompas Durk D04 y Alexander 104 para la nota Fa3, donde se observa la energía repartida en los armónicos pares frente a la repartida en los impares (primer espectro) y la energía repartida en los armónicos impares frente a la repartida en los pares (segundo espectro)

4.4.2. Sol3

En este apartado se va a hacer el mismo estudio que en el caso anterior para la nota Fa3. Lo que varía en este caso es que no se utiliza la trompa en Sib, sino la de Fa, pero sin accionar ningún cilindro.

En las tablas 4.10 y 4.11 se puede ver la matriz de las amplitudes de los dieciséis primeros armónicos para cada modelo de trompa.

Tabla 4.10: Matriz de Amplitudes de los ocho primeros armónicos para la nota Sol3 correspondientes a cada trompa

TROMPA/NºARM	1	2	3	4	5	6	7	8
Alex. 103 Am	0.3024	0.4159	0.1386	0.0271	0.1325	0.0713	0.0582	0.0284
Alex. 103 OM	0.1955	0.2685	0.1759	0.0743	0.0802	0.055	0.0428	0.0218
Alex.103 SL	0.1836	0.295	0.1951	0.1007	0.0413	0.0165	0.0459	0.0274
Alex. 104	0.1732	0.449	0.1665	0.0724	0.0211	0.0379	0.0195	0.0313
Durk D03	0.2263	0.3751	0.1416	0.0554	0.0587	0.0391	0.035	0.0175
Durk D04	0.2022	0.3944	0.1359	0.0991	0.042	0.0247	0.0294	0.0187
Pleischl	0.2172	0.3752	0.1644	0.1483	0.0415	0.0075	0.0368	0.0091
Schmid	0.2695	0.3754	0.1203	0.121	0.0664	0.0339	0.0143	0.0138
Yamaha 667D	0.2561	0.2209	0.1864	0.0963	0.06	0.0344	0.0454	0.0292

Tabla 4.11: Matriz de Amplitudes de los ocho últimos armónicos para la nota Sol3 correspondientes a cada trompa

TROMPA/NºARM	9	10	11	12	13	14	15	16
Alex. 103 Am	0.0021	0.0045	0.0029	0.0023	0.0021	0.001	0.0013	0.0009
Alex. 103 OM	0.012	0.0038	0.0026	0.0029	0.0014	0.0014	0.0011	0.0008
Alex.103 SL	0.0129	0.0022	0.0018	0.0033	0.0016	0.0009	0.0005	0.0009
Alex. 104	0.0087	0.002	0.0016	0.0011	0.0008	0.001	0.0005	0.0005
Durk D03	0.0078	0.002	0.0017	0.0024	0.0018	0.0005	0.001	0.0005
Durk D04	0.0037	0.0013	0.0014	0.002	0.0013	0.0006	0.0007	0.0004
Pleischl	0.0053	0.0042	0.0019	0.0016	0.0013	0.0008	0.0004	0.0004
Schmid	0.0068	0.0008	0.0014	0.0016	0.0013	0.0006	0.0007	0.0004
Yamaha 667D	0.009	0.0042	0.0064	0.0044	0.0016	0.0012	0.0008	0.0006

Haciendo un análisis de la matriz de amplitudes de los armónicos, se obtiene un listado de las trompas ordenadas de mayor a menor número de armónicos con energía significativa (Ver Tabla 6 en Apéndice A), donde se observa que la trompa con mayor número de componentes armónicas para la nota Sol3 es la *Alexander 103 Oro Messing* y la de menor número es la *Schmid*.

En la figura 4.16 se presenta un gráfico en el que aparecen los espectrogramas de cada trompa para esta nota, donde se pueden apreciar las diferencias entre trompas en cuanto al número de armónicos relevantes. Se puede también observar que en el caso de Sol3 aparecen más armónicos en los espectrogramas de todas las trompas que en el caso de Fa3, ya que, como se dijo anteriormente, la longitudes de las trompas de Fa y Sib son diferentes, y en este caso se está utilizando la primera.

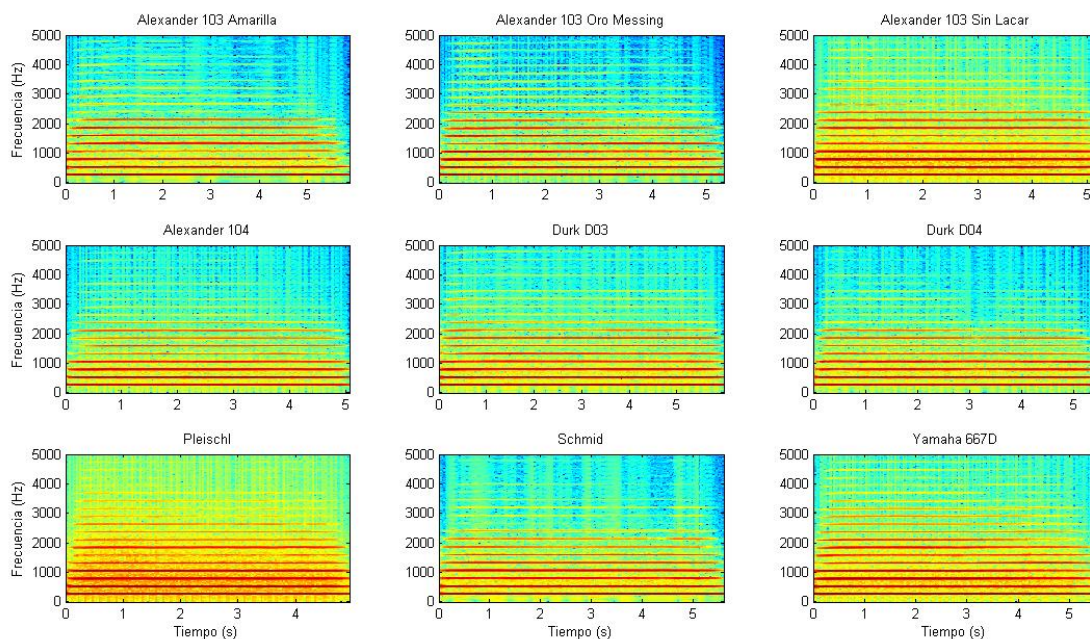


Figura 4.16: Espectrograma de cada trompa para la nota Sol3.

Para ver mejor estas diferencias, en la figura 4.17 se muestran los espectrogramas para las trompas *Alexander 103 Oro Messing* y *Schmid*. Para esta nota los espectrogramas son un poco ruidosos, ya que aparece una saturación que puede ser debida a que quizás la frecuencia de la nota Sol3 coincide con la frecuencia de resonancia de algún objeto de la sala donde se hicieron las grabaciones. A pesar de ello, se observa que para la primera trompa el espectrograma tiene

más franjas de color que para la segunda, como se obtuvo del análisis de la matriz de amplitudes.

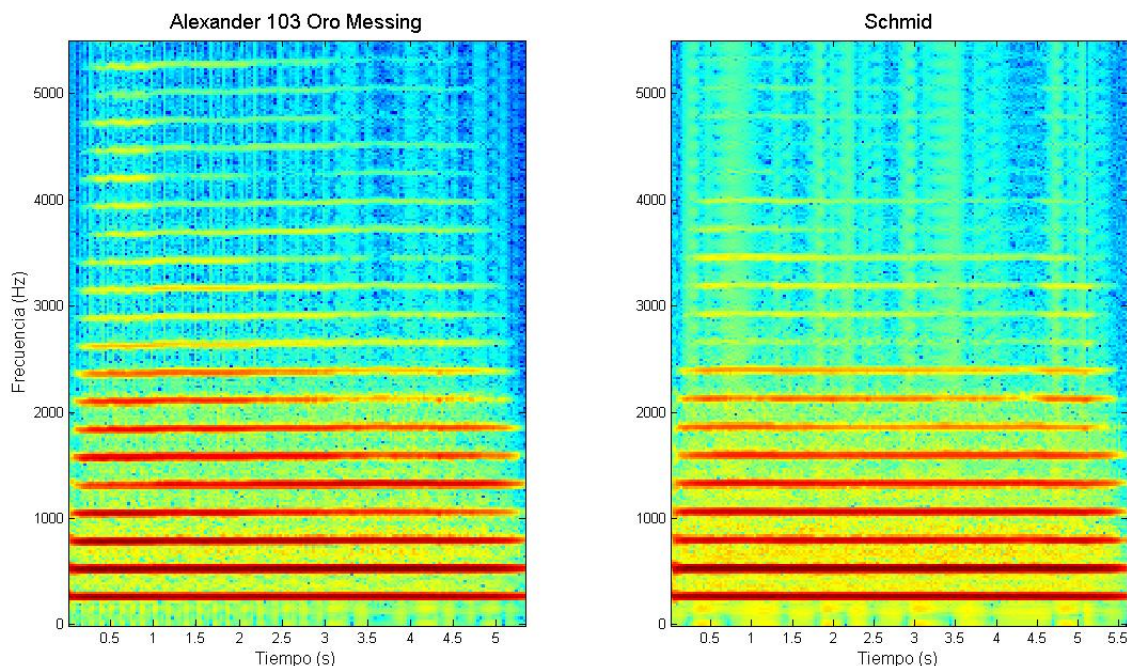


Figura 4.17: Espectrogramas de las trompas *Alexander 103 Oro Messing* y *Schmid* para la nota *Sol3*.

Para seguir con el estudio espectral de las señales acústicas del conjunto de trompas para la nota *Sol3*, se vuelve a analizar la matriz de amplitudes con el fin de obtener un listado de las trompas (Ver Tabla 6 en Apéndice A) ordenadas según cómo esté distribuida la energía de la señal en:

- Los primeros ocho armónicos de la serie. La trompa con más energía en sus primeros ocho armónicos es la trompa *Alexander 103 Amarilla* y la que menos es la trompa *Alexander 103 Sin Lacar*.
- Los últimos ocho armónicos de la serie. La trompa con más energía en sus últimos ocho armónicos es la trompa *Yamaha 667D* y la que menos es la trompa *Pleischl*.
- Los armónicos pares de la serie frente a los impares. La trompa, cuya energía está repartida en mayor medida en sus armónicos pares frente a sus armónicos impares, es la *Alexander 104* y la que menos es la trompa *Durk D03*.

- Los armónicos impares de la serie frente a los pares. Solamente hay un caso en el que el nivel de energía repartida en los armónicos impares supera a la energía en los armónicos pares. Y ese caso es para la trompa *Alexander 103 Amarilla*.

A continuación, se va a analizar cómo está repartida la energía de una señal a lo largo de su serie armónica observando su espectro en frecuencia. En la figura 4.18 están representados los espectros en frecuencia de todas las trompas para la señal de audio correspondiente a la nota Sol3.

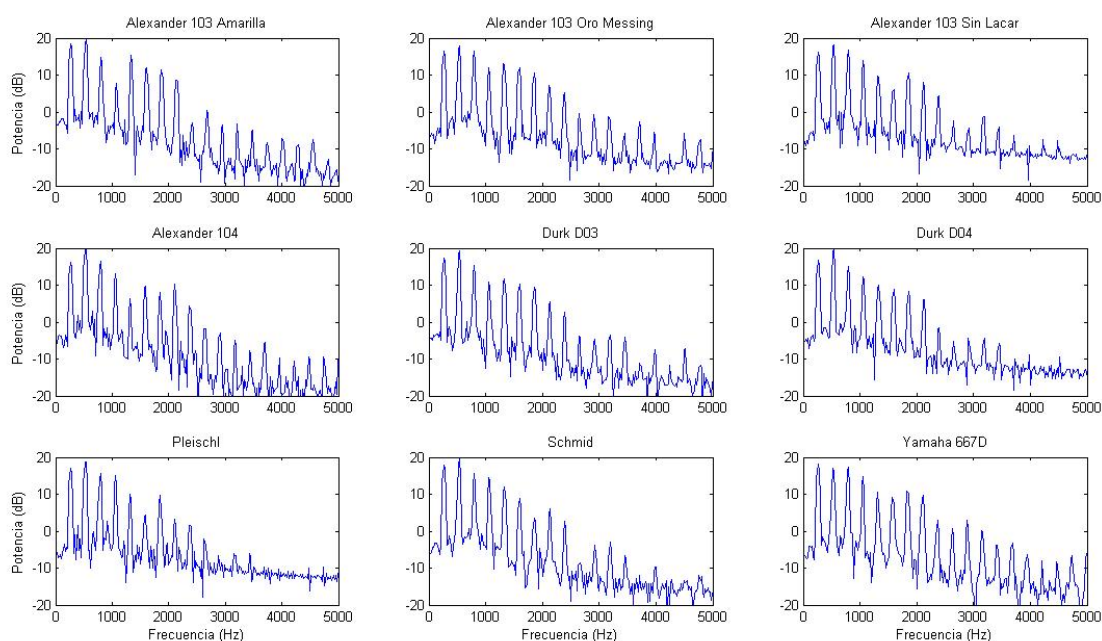


Figura 4.18: *Espectro en frecuencia de cada trompa para la nota Sol3.*

Comparando los espectros en frecuencia de la figura 4.18 se demuestran los resultados obtenidos tras el análisis de la matriz de amplitudes, realizado anteriormente.



4.4.3. Do4

La siguiente nota a analizar es Do4. Para ejecutar esta nota, el trompista no tiene que pulsar ningún cilindro, simplemente se toca la trompa en Sib “al aire”.

En las tablas 4.12 y 4.13 se puede ver la matriz de las amplitudes de los dieciséis primeros armónicos para cada modelo de trompa.

Tabla 4.12: Matriz de Amplitudes de los ocho primeros armónicos para la nota Do4 correspondientes a cada trompa

TROMPA/NºARM	1	2	3	4	5	6	7	8
Alex. 103 Am	0.4192	0.4564	0.0904	0.039	0.0166	0.0086	0.0038	0.0016
Alex. 103 OM	0.3995	0.4532	0.0759	0.0467	0.0165	0.0094	0.0019	0.0048
Alex. 103 SL	0.439	0.4837	0.121	0.052	0.002	0.0015	0.001	0.0007
Alex. 104	0.3935	0.3548	0.1421	0.0381	0.0132	0.0104	0.0027	0.0011
Durk D03	0.3943	0.3462	0.1548	0.0337	0.0045	0.0012	0.0006	0.0006
Durk D04	0.4451	0.4097	0.1293	0.0265	0.004	0.0012	0.0008	0.0007
Pleischl	0.4157	0.4261	0.0802	0.0145	0.0108	0.0013	0.0008	0.0007
Schmid	0.4548	0.3648	0.0443	0.0453	0.028	0.0073	0.0042	0.0013
Yamaha 667D	0.5198	0.3573	0.1489	0.0517	0.0378	0.0104	0.0019	0.0007

Tabla 4.13: Matriz de Amplitudes de los ocho últimos armónicos para la nota Do4 correspondientes a cada trompa

TROMPA/NºARMÓNICO	9	10	11	12	13	14	15	16
Alexander 103 Amarilla	0.0014	0.0006	0.0006	0.0006	0.0005	0.0004	0.0004	0.0004
Alexander 103 Oro Messing	0.0026	0.0025	0.0022	0.0016	0.0017	0.0015	0.0014	0.0013
Alexander 103 Sin Lacar	0.0007	0.0006	0.0005	0.0005	0.0004	0.0004	0.0004	0.0004
Alexander 104	0.0007	0.0006	0.0006	0.0004	0.0004	0.0003	0.0003	0.0003
Durk D03	0.0005	0.0004	0.0004	0.0003	0.0004	0.0003	0.0002	0.0003
Durk D04	0.0006	0.0005	0.0005	0.0005	0.0004	0.0004	0.0003	0.0003
Pleischl	0.0006	0.0005	0.0005	0.0005	0.0004	0.0004	0.0003	0.0003
Schmid	0.0008	0.0005	0.0005	0.0005	0.0004	0.0004	0.0004	0.0003
Yamaha 667D	0.001	0.0005	0.0005	0.0004	0.0004	0.0004	0.0004	0.0004

A continuación, haciendo el análisis de la matriz de amplitudes de los armónicos, se obtiene el listado de las trompas ordenadas de mayor a menor número de armónicos con energía significativa (Ver Tabla 7 en Apéndice A), donde se observa que la trompa con mayor número de componentes armónicas para la nota Do4 es la *Alexander 103 Oro Messing* y la de menor número es la *Durk D03*.

En la figura 4.19 se presenta un gráfico en el que aparecen los espectrogramas de cada trompa para esta nota, donde se pueden apreciar las diferencias entre trompas en cuanto al número de armónicos relevantes. Se puede también observar que en el caso de Do4 los espectrogramas son más “nítidos” que para las notas Fa3 y Sol3. Esto es debido a que los armónicos están más separados unos de otros, ya que la frecuencia fundamental es considerablemente mayor (353 Hz frente a 235 Hz para Fa3).

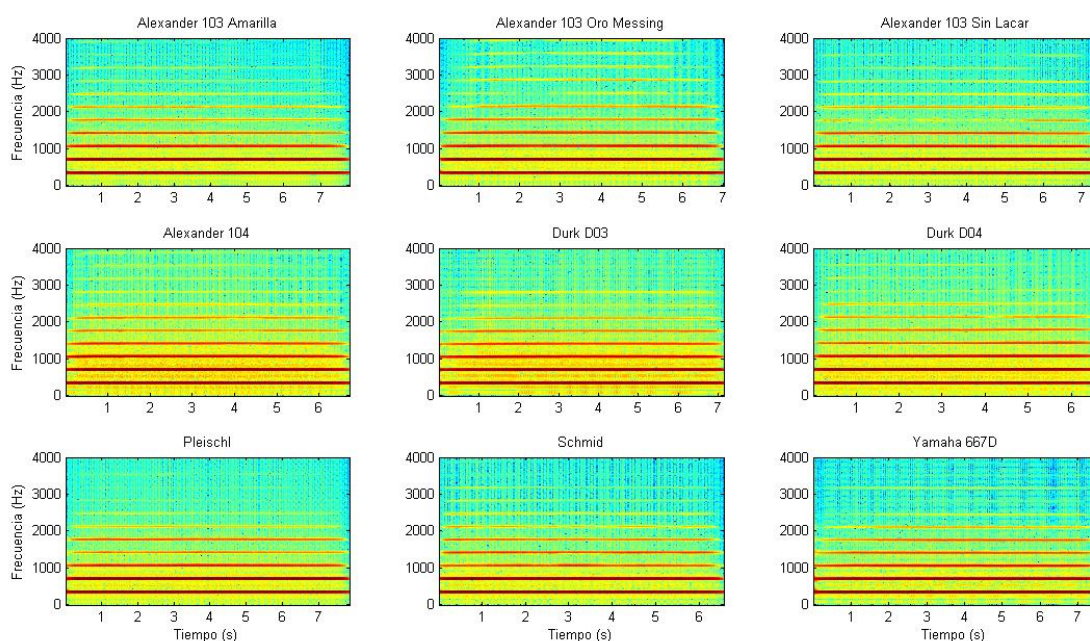


Figura 4.19: Espectrograma de cada trompa para la nota Do4.

Para ver mejor estas diferencias, en la figura 4.20 se muestran los espectrogramas para las trompas *Alexander 103 Oro Messing* y *Durk D03*, donde se observa la diferencia de número de armónicos entre una y otra.

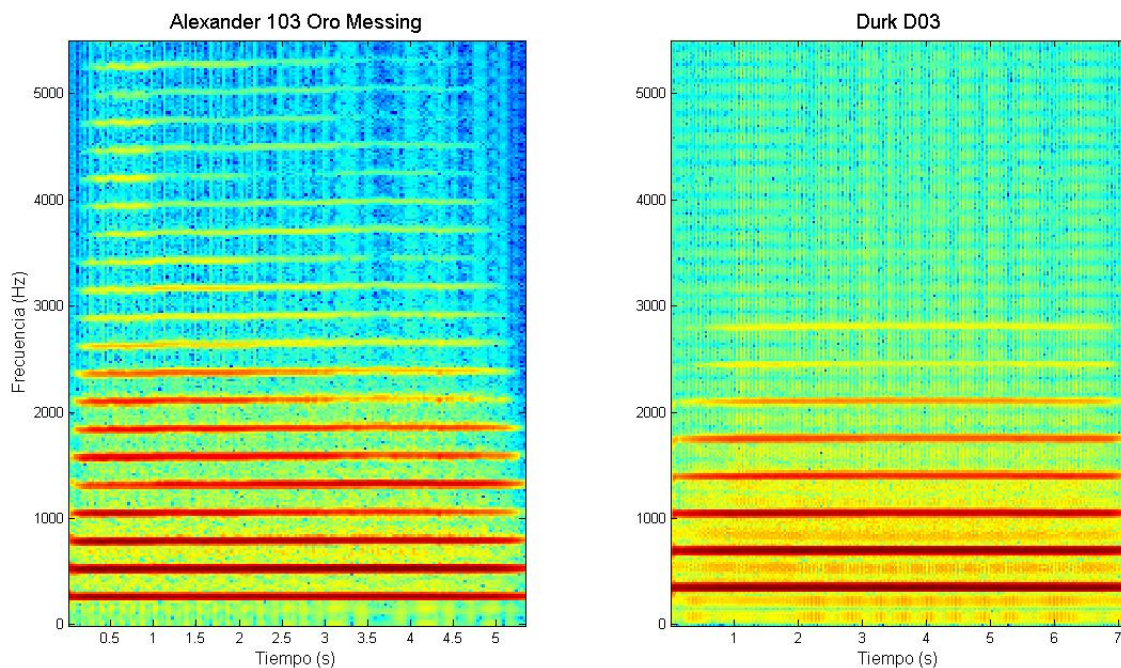


Figura 4.20: *Espectrogramas de las trompas Alexander 103 Oro Messing y Durk D03 para la nota Do<sub>4</sub>.*

Para seguir con el estudio espectral de las señales acústicas del conjunto de trompas para la nota Do<sub>4</sub>, se vuelve a analizar la matriz de amplitudes con el fin de obtener un listado de las trompas (Ver Tabla 7 en Apéndice A) ordenadas según cómo esté distribuida la energía de la señal en:

- Los primeros ocho armónicos de la serie. La trompa con más energía en sus primeros ocho armónicos es la trompa *Yamaha 667D* y la que menos es la trompa *Durk D03*.
- Los últimos ocho armónicos de la serie. La trompa con más energía en sus últimos ocho armónicos es la trompa *Alexander 103 Oro Messing* y la que menos es la trompa *Durk D03*.
- Los armónicos pares de la serie frente a los impares. La trompa, cuya energía está repartida en mayor medida en sus armónicos pares frente a sus armónicos impares, es la *Alexander 103 Sin Lacar* y la que menos es la trompa *Pleischl*.
- Los armónicos impares de la serie frente a los pares. Para la nota Do<sub>4</sub> no hay ninguna señal



en la que el nivel de energía repartida en los armónicos impares supere el nivel de energía en los pares.

A continuación, se va a analizar cómo está repartida la energía de una señal a lo largo de su serie armónica observando su espectro en frecuencia. En la figura 4.21 están representados los espectros en frecuencia de todas las trompas para la señal de audio correspondiente a la nota Do4.

Se puede ver que para la nota Do4 el ancho de banda es en general más estrecho que en las notas anteriores, es decir, aparecen un menor número de armónicos (Fig. 4.21).

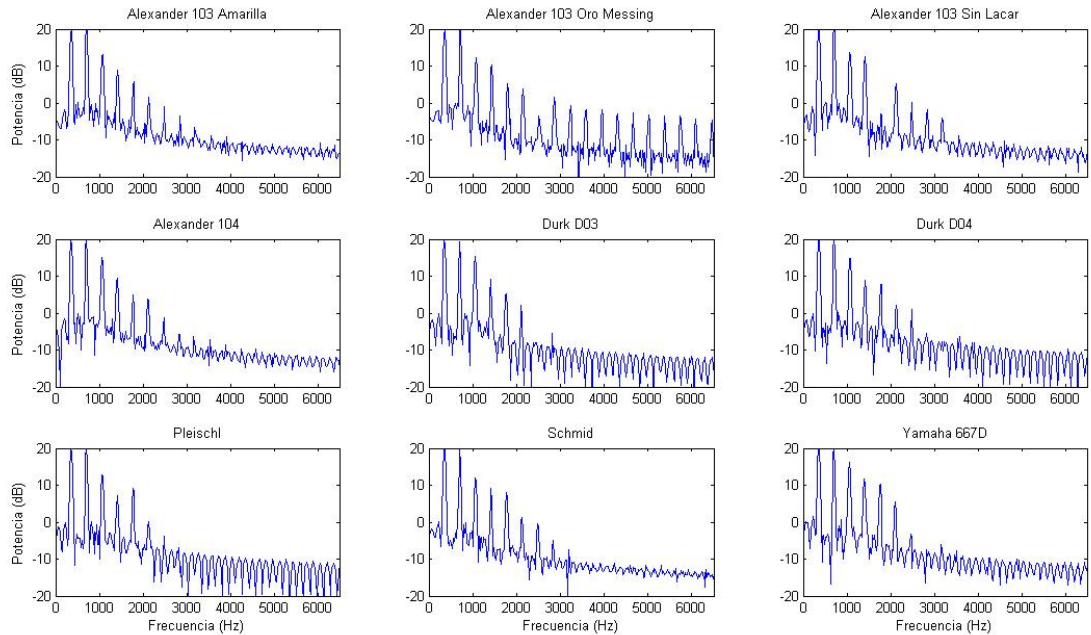


Figura 4.21: *Espectro en frecuencia de cada trompa para la nota Do4.*

Comparando los espectros en frecuencia de la figura 4.21 se demuestran los resultados obtenidos tras el análisis de la matriz de amplitudes, realizado anteriormente.

4.4.4. Re4

Para ejecutar la nota Re4, se tienen que pulsar los dos primeros cilindros de la trompa en Sib.

En las tablas 4.14 y 4.15 se puede ver la matriz de las amplitudes de los dieciséis primeros armónicos para cada modelo de trompa.

Tabla 4.14: Matriz de Amplitudes de los ocho primeros armónicos para la nota Re4 correspondientes a cada trompa

TROMPA/NºARM	1	2	3	4	5	6	7	8
Alex. 103 Am	0.6292	0.3692	0.0671	0.0922	0.0159	0.0023	0.0013	0.0008
Alex. 103 OM	0.6599	0.2134	0.0597	0.0507	0.0203	0.0258	0.006	0.0058
Alex.103 SL	0.8307	0.0518	0.0546	0.0938	0.0549	0.0396	0.0126	0.0051
Alex. 104	0.6505	0.2661	0.0541	0.0346	0.0653	0.0149	0.0076	0.0034
Durk D03	0.6495	0.3742	0.103	0.0239	0.0062	0.0011	0.0008	0.0009
Durk D04	0.778	0.2777	0.1858	0.1058	0.0187	0.0084	0.0089	0.0057
Pleischl	0.7204	0.1068	0.0478	0.0842	0.0313	0.0198	0.004	0.0027
Schmid	0.6022	0.1529	0.2396	0.0819	0.03	0.0129	0.0141	0.005
Yamaha 667D	0.6973	0.1476	0.0283	0.1106	0.0172	0.0267	0.0098	0.0015

Tabla 4.15: Matriz de Amplitudes de los ocho últimos armónicos para la nota Re4 correspondientes a cada trompa

TROMPA/NºARM	9	10	11	12	13	14	15	16
Alex. 103 Am	0.0007	0.0006	0.0005	0.0005	0.0005	0.0004	0.0005	0.0004
Alex. 103 OM	0.0015	0.0014	0.0008	0.0006	0.0005	0.0005	0.0004	0.0004
Alex.103 SL	0.0017	0.002	0.0017	0.0011	0.0009	0.0011	0.0005	0.0007
Alex. 104	0.0066	0.001	0.0011	0.0019	0.0008	0.001	0.0005	0.0004
Durk D03	0.0007	0.0006	0.0006	0.0006	0.0005	0.0004	0.0005	0.0004
Durk D04	0.0021	0.0019	0.0009	0.0006	0.0006	0.0007	0.0006	0.0005
Pleischl	0.0023	0.0025	0.0007	0.0008	0.0006	0.0006	0.0004	0.0004
Schmid	0.0014	0.0042	0.001	0.0011	0.0005	0.0006	0.0004	0.0007
Yamaha 667D	0.0027	0.0036	0.0009	0.0009	0.0007	0.0008	0.0004	0.0004

A continuación, haciendo el análisis de la matriz de amplitudes de los armónicos, se obtiene el listado de las trompas ordenadas de mayor a menor número de armónicos con energía significativa (Ver Tabla 8 en Apéndice A), donde se observa que la trompa con mayor número de componentes armónicas para la nota Re4 es la *Alexander 103 Sin Lacar* y la de menor número es la *Durk D03*.

En la figura 4.22 se presenta un gráfico en el que aparecen los espectrogramas de cada trompa para esta nota, donde se pueden apreciar las diferencias entre trompas en cuanto al número de armónicos relevantes.

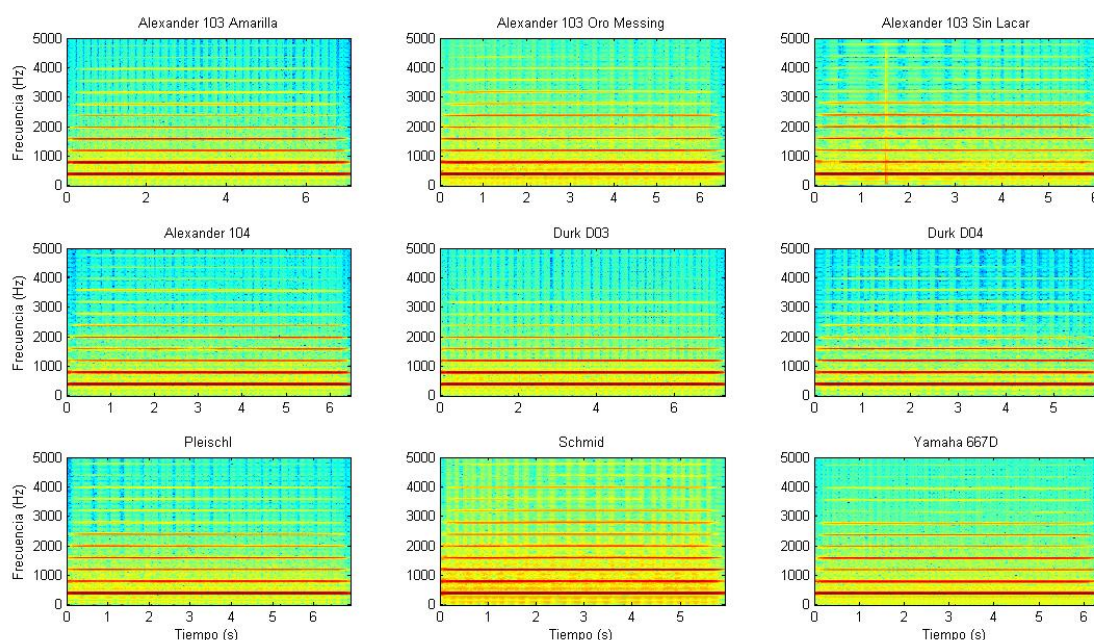


Figura 4.22: Espectrograma de cada trompa para la nota Re4.

Para ver mejor estas diferencias, en la figura 4.23 se muestran los espectrogramas para las trompas *Alexander 103 Sin Lacar* y *Durk D03*, donde se observa la diferencia de número de armónicos entre una y otra.

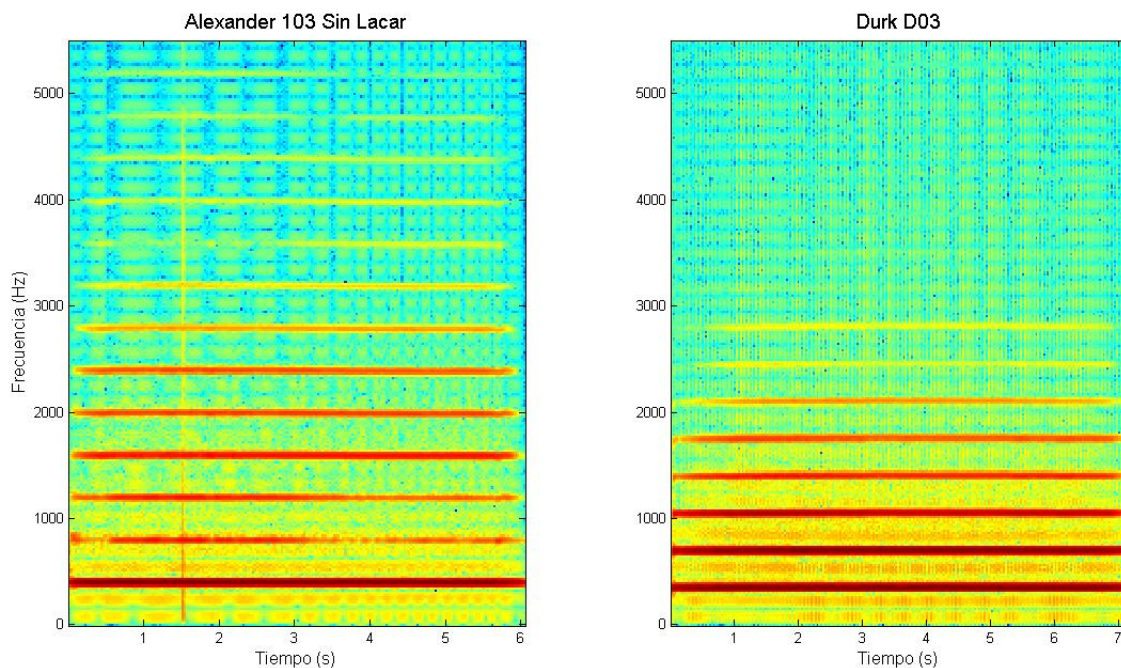


Figura 4.23: *Espectrogramas de las trompas Alexander 103 Sin Lacar y Durk D03 para la nota Re4.*

Para seguir con el estudio espectral de las señales acústicas del conjunto de trompas para la nota Re4, se vuelve a analizar la matriz de amplitudes con el fin de obtener un listado de las trompas (Ver Tabla 8 en Apéndice A) ordenadas según cómo esté distribuida la energía de la señal en:

- Los primeros ocho armónicos de la serie. La trompa con más energía en sus primeros ocho armónicos es la trompa *Durk D04* y la que menos es la trompa *Pleischl*.
- Los últimos ocho armónicos de la serie. La trompa con más energía en sus últimos ocho armónicos es la trompa *Alexander 104* y la que menos es la trompa *Alexander 103 Amarilla*.
- Los armónicos pares de la serie frente a los impares. La trompa, cuya energía está repartida en mayor medida en sus armónicos pares frente a sus armónicos impares, es la *Alexander 103 Amarilla* y la que menos es la trompa *Yamaha 667D*.
- Los armónicos impares de la serie frente a los pares. Para la nota Re4 solamente hay un

caso en el que el nivel de energía repartida en los armónicos impares supera a la energía en los armónicos pares. Y ese caso es para la trompa *Alexander 104*.

A continuación, se va a analizar cómo está repartida la energía de una señal a lo largo de su serie armónica observando su espectro en frecuencia. En la figura 4.24 están representados los espectros en frecuencia de todas las trompas para la señal de audio correspondiente a la nota Re4.

En este caso el ancho de banda es más amplio que para la nota Do4, debido a que, al pulsar dos cilindros para hacer Re4, se está utilizando más longitud de tubo que para tocar Do4, para la que no se utilizaba ningún tubo adicional (Fig. 4.24).

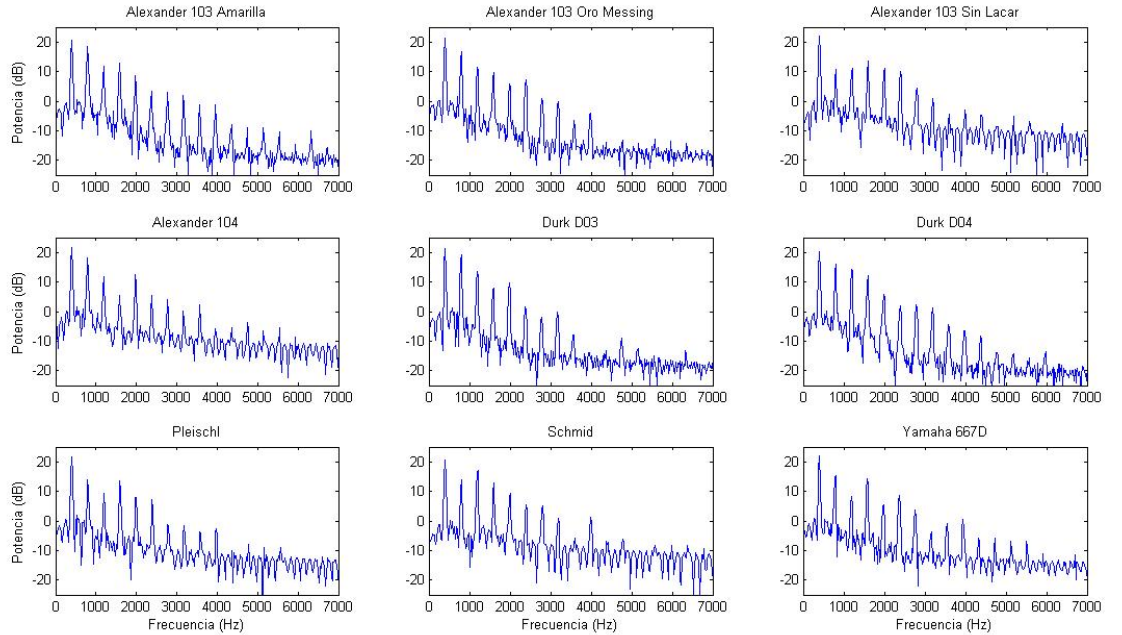


Figura 4.24: Espectro de cada trompa para la nota Re4.

Comparando los espectros en frecuencia de la figura 4.24 se demuestran los resultados obtenidos tras el análisis de la matriz de amplitudes, realizado anteriormente.



4.4.5. Mi4

Para tocar la nota Mi4 se utiliza el segundo cilindro de la trompa en Sib.

En las tablas 4.16 y 4.17 se puede ver la matriz de las amplitudes de los dieciséis primeros armónicos para cada modelo de trompa.

Tabla 4.16: Matriz de Amplitudes de los ocho primeros armónicos para la nota Mi4 correspondientes a cada trompa

TROMPA/NºARM	1	2	3	4	5	6	7	8
Alex. 103 Am	0.5916	0.3729	0.136	0.1435	0.015	0.0076	0.0065	0.0051
Alex. 103 OM	0.4686	0.4163	0.0657	0.1367	0.0266	0.0078	0.0036	0.0037
Alex.103 SL	0.6324	0.2234	0.1464	0.0603	0.0069	0.0038	0.0031	0.001
Alex. 104	0.357	0.2768	0.092	0.1454	0.0079	0.003	0.0027	0.0013
Durk D03	0.5345	0.4084	0.0853	0.0749	0.0226	0.0031	0.0045	0.0012
Durk D04	0.36	0.3977	0.2333	0.0413	0.0233	0.005	0.0044	0.0034
Pleischl	0.6144	0.501	0.1912	0.0928	0.0284	0.0046	0.0045	0.0021
Schmid	0.6533	0.4665	0.1738	0.0702	0.0233	0.004	0.0044	0.0021
Yamaha 667D	0.808	0.3202	0.1509	0.0862	0.0314	0.0067	0.0039	0.0012

Tabla 4.17: Matriz de Amplitudes de los ocho últimos armónicos para la nota Mi4 correspondientes a cada trompa

TROMPA/NºARM	9	10	11	12	13	14	15	16
Alex. 103 Am	0.0035	0.0008	0.0011	0.001	0.0007	0.0005	0.0005	0.0004
Alex. 103 OM	0.001	0.0016	0.0008	0.0011	0.0005	0.0004	0.0004	0.0004
Alex.103 SL	0.0006	0.0006	0.0005	0.0004	0.0004	0.0004	0.0004	0.0004
Alex. 104	0.0019	0.0007	0.0006	0.0005	0.0004	0.0003	0.0003	0.0002
Durk D03	0.0015	0.0012	0.0005	0.0004	0.0004	0.0003	0.0003	0.0003
Durk D04	0.0021	0.0013	0.0005	0.0005	0.0004	0.0004	0.0003	0.0003
Pleischl	0.0011	0.0007	0.0006	0.0005	0.0005	0.0004	0.0004	0.0004
Schmid	0.0012	0.0006	0.0006	0.0005	0.0005	0.0005	0.0004	0.0004
Yamaha 667D	0.0008	0.0009	0.0009	0.0006	0.0005	0.0005	0.0005	0.0004

A continuación, se hace el análisis de la matriz de amplitudes de los armónicos, obteniéndose el listado de las trompas ordenadas de mayor a menor número de armónicos con energía significativa (Ver Tabla 9 en Apéndice A), donde se observa que la trompa con mayor número de componentes armónicas para la nota Mi4 es la *Alexander 103 Amarilla* y la de menor número es la *Alexander 103 Sin Lacar*.

En la figura 4.25 se presenta un gráfico en el que aparecen los espectrogramas de cada trompa para esta nota, donde se pueden apreciar las diferencias entre trompas en cuanto al número de armónicos relevantes.

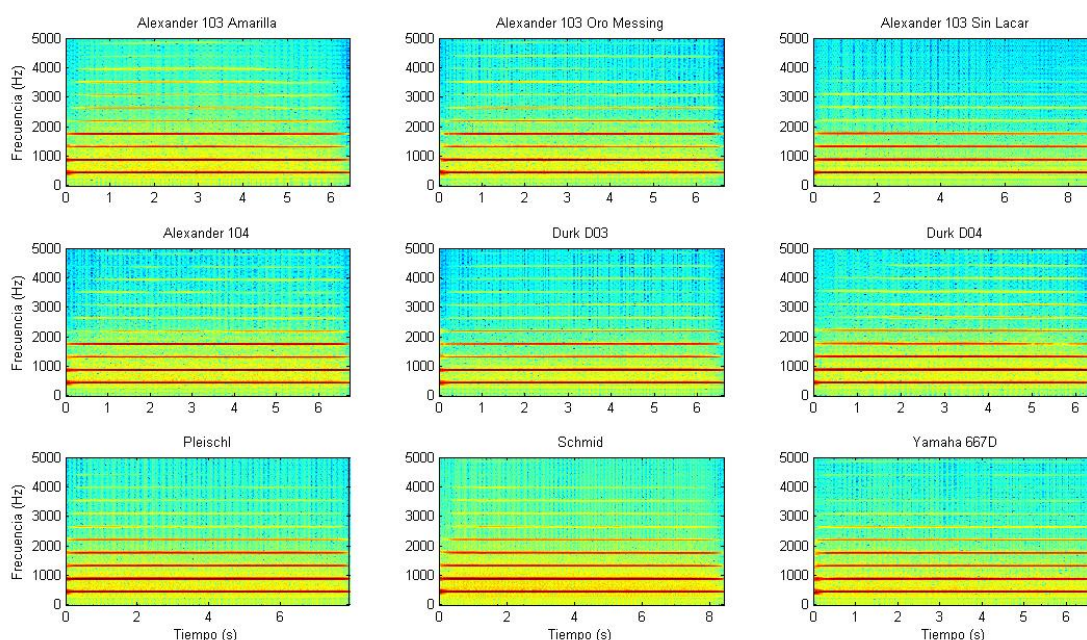


Figura 4.25: Espectrograma de cada trompa para la nota Mi4.

Para ver mejor estas diferencias, en la figura 4.26 se muestran los espectrogramas para las trompas *Alexander 103 Amarilla* y *Alexander 103 Sin Lacar*, donde se observa la diferencia de número de armónicos entre una y otra.

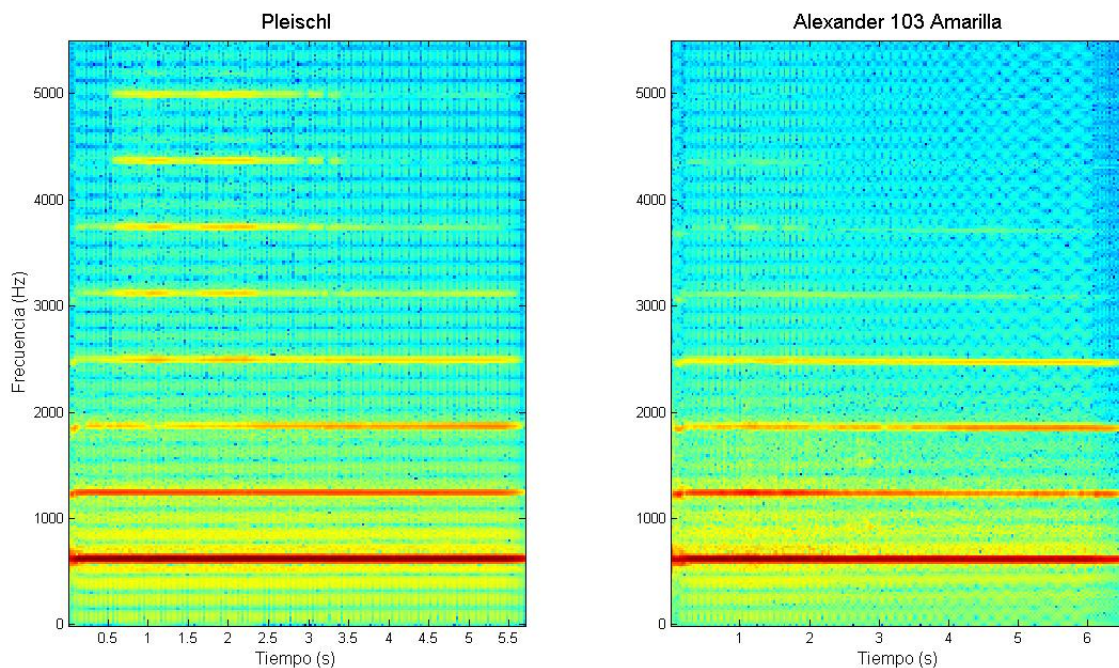


Figura 4.26: Espectrogramas de las trompas *Alexander 103 Amarilla* y *Alexander 103 Sin Lacar* para la nota *Mi<sub>4</sub>*.

Para seguir con el estudio espectral de las señales acústicas del conjunto de trompas para la nota *Re<sub>4</sub>*, se vuelve a analizar la matriz de amplitudes con el fin de obtener un listado de las trompas (Anexo 9) ordenadas según cómo esté distribuida la energía de la señal en:

- Los primeros ocho armónicos de la serie. La trompa con más energía en sus primeros ocho armónicos es la trompa *Pleischl* y la que menos es la trompa *Alexander 104*.
- Los últimos ocho armónicos de la serie. La trompa con más energía en sus últimos ocho armónicos es la trompa *Alexander 103 Amarilla* y la que menos es la trompa *Alexander 103 Sin Lacar*.
- Los armónicos pares de la serie frente a los impares. La trompa, cuya energía está repartida en mayor medida en sus armónicos pares frente a sus armónicos impares, es la *Alexander 104* y la que menos es la trompa *Durk D04*.
- Los armónicos impares de la serie frente a los pares. Para la nota *Mi<sub>4</sub>* no hay ninguna señal



en la que el nivel de energía repartida en los armónicos impares supere el nivel de energía en los pares.

A continuación, se va a analizar cómo está repartida la energía de una señal a lo largo de su serie armónica observando su espectro en frecuencia. En la figura 4.27 están representados los espectros en frecuencia de todas las trompas para la señal de audio correspondiente a la nota Mi4.

Como se ha explicado anteriormente, es lógico pensar que en este caso tiene menor ancho de banda que en el caso de Re4, pero más que para Do4, ya que para ejecutar Mi4 se pulsa el segundo cilindro de la trompa en Sib, para Re4 los dos primeros y para Do4 ninguno de los tres.

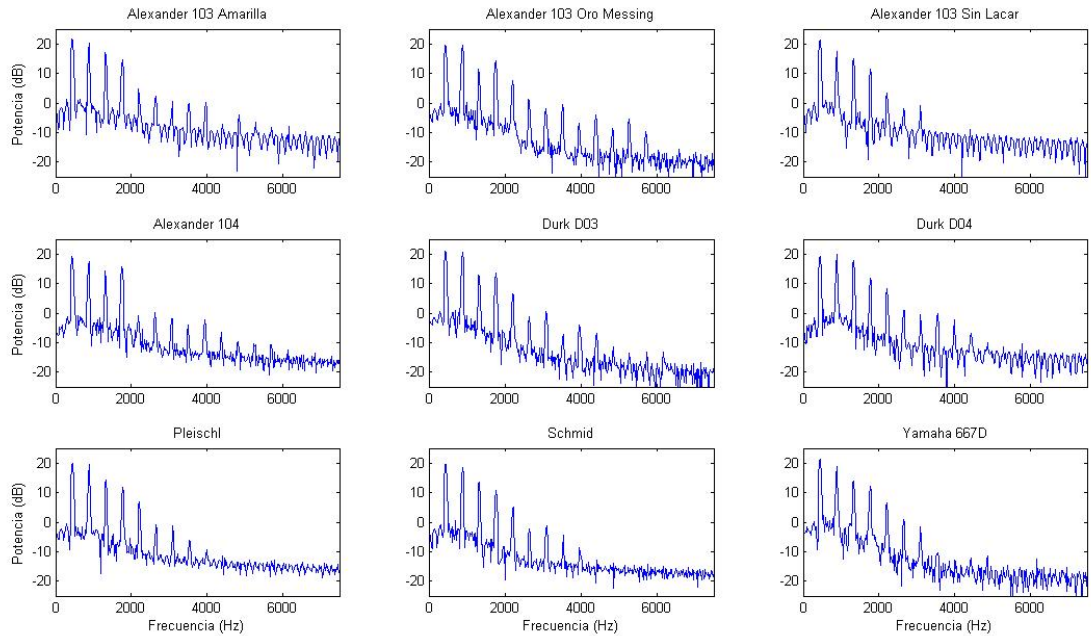


Figura 4.27: Espectro de cada trompa para la nota Mi4.

Comparando los espectros en frecuencia de la figura 4.27 se demuestran los resultados obtenidos tras el análisis de la matriz de amplitudes, realizado anteriormente.

4.4.6. Sib4

Para terminar el estudio del timbre de la trompa, se va a analizar la nota Sib4, la nota más aguda de las analizadas. Para ejecutarla se utiliza el primer cilindro de la trompa en Sib.

En las tablas 4.18 y 4.19 se puede ver la matriz de las amplitudes de los dieciséis primeros armónicos para cada modelo de trompa.

Tabla 4.18: Matriz de Amplitudes de los ocho primeros armónicos para la nota Sib4 correspondientes a cada trompa

TROMPA/NºARM	1	2	3	4	5	6	7	8
Alex. 103 Am	0.0021	0.5681	0.0028	0.0521	0.0015	0.0173	0.001	0.0072
Alex. 103 OM	0.0046	0.7319	0.0049	0.1255	0.0024	0.0096	0.0009	0.0026
Alex.103 SL	0.0045	0.8254	0.0048	0.1752	0.0022	0.0857	0.0014	0.031
Alex. 104	0.002	0.4569	0.0023	0.2088	0.0015	0.0528	0.0008	0.0035
Durk D03	0.0023	0.879	0.0039	0.043	0.0022	0.0072	0.0016	0.0028
Durk D04	0.008	0.8935	0.0081	0.0833	0.0021	0.0142	0.0014	0.004
Pleischl	0.0057	0.8874	0.0059	0.0636	0.0028	0.0154	0.0011	0.0081
Schmid	0.0025	0.7318	0.0028	0.0735	0.0017	0.0399	0.0012	0.0125
Yamaha 667D	0.002	0.8247	0.0033	0.0481	0.0019	0.012	0.0014	0.0019

Tabla 4.19: Matriz de Amplitudes de los ocho últimos armónicos para la nota Sib4 correspondientes a cada trompa

TROMPA/NºARM	9	10	11	12	13	14	15	16
Alex. 103 Am	0.0007	0.0011	0.0006	0.0007	0.0005	0.0005	0.0004	0.0004
Alex. 103 OM	0.001	0.0021	0.0007	0.0017	0.0006	0.0006	0.0005	0.0005
Alex.103 SL	0.0011	0.0151	0.0008	0.0052	0.0007	0.0067	0.0006	0.0058
Alex. 104	0.0006	0.0025	0.0005	0.0014	0.0004	0.0008	0.0004	0.0006
Durk D03	0.0012	0.0013	0.001	0.001	0.0009	0.0008	0.0007	0.0007
Durk D04	0.0011	0.0011	0.0009	0.0009	0.0007	0.0007	0.0006	0.0006
Pleischl	0.0011	0.0037	0.0008	0.0037	0.0007	0.0029	0.0006	0.0023
Schmid	0.0009	0.0037	0.0007	0.0009	0.0006	0.0007	0.0005	0.0007
Yamaha 667D	0.0011	0.0012	0.0009	0.0009	0.0008	0.0007	0.0007	0.0006

A continuación, se hace el análisis de la matriz de amplitudes de los armónicos, obteniéndose el listado de las trompas ordenadas de mayor a menor número de armónicos con energía significativa (Ver Tabla 10 en Apéndice A), donde se observa que la trompa con mayor número de componentes armónicas para la nota Sib4 es la *Pleischl* y la de menor número es la *Alexander 103 Amarilla*.

En la figura 4.28 se presenta un gráfico en el que aparecen los espectrogramas de cada trompa para esta nota, donde se pueden apreciar las diferencias entre trompas en cuanto al número de armónicos relevantes.

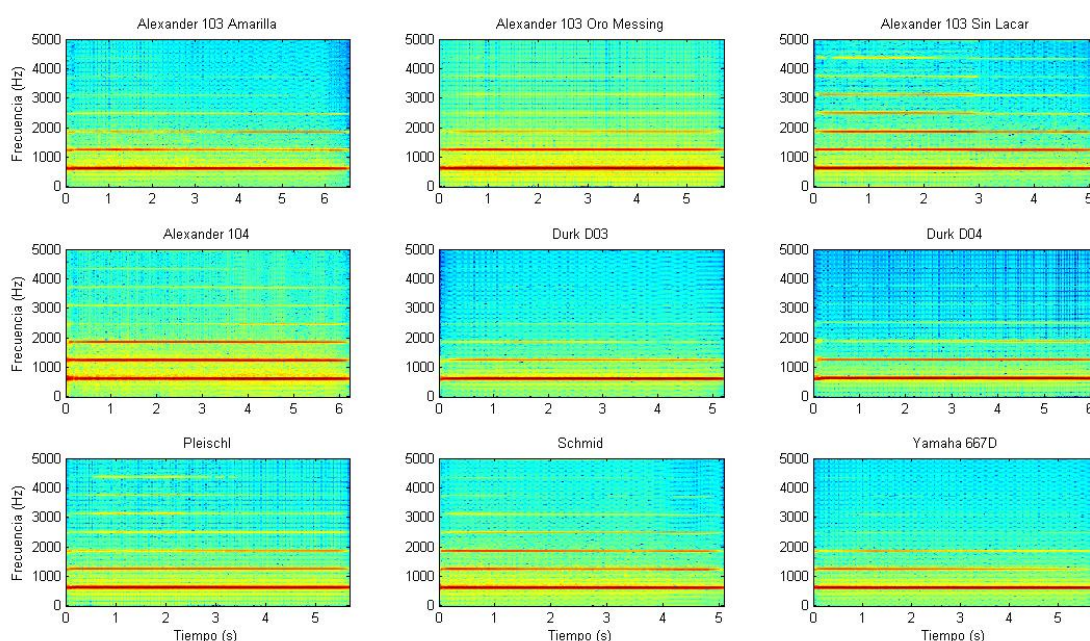


Figura 4.28: Espectrograma de cada trompa para la nota Sib4.

Hay que tener en cuenta que al ser una nota bastante aguda, es complicada de ejecutar, por lo que es más difícil controlar la intensidad del ataque. Por ello, hay grabaciones en las que la intensidad en el ataque es muy superior a la del resto, como se observa en los espectrogramas de las trompas Alexander 103 Oro Messing y Sin Lacar.

Para demostrar el resultado del análisis de la matriz de amplitudes en cuanto a número de armónicos, en la figura 4.29 se muestran los espectrogramas para las trompas *Pleischl* y *Alexander 103 Amarilla*.

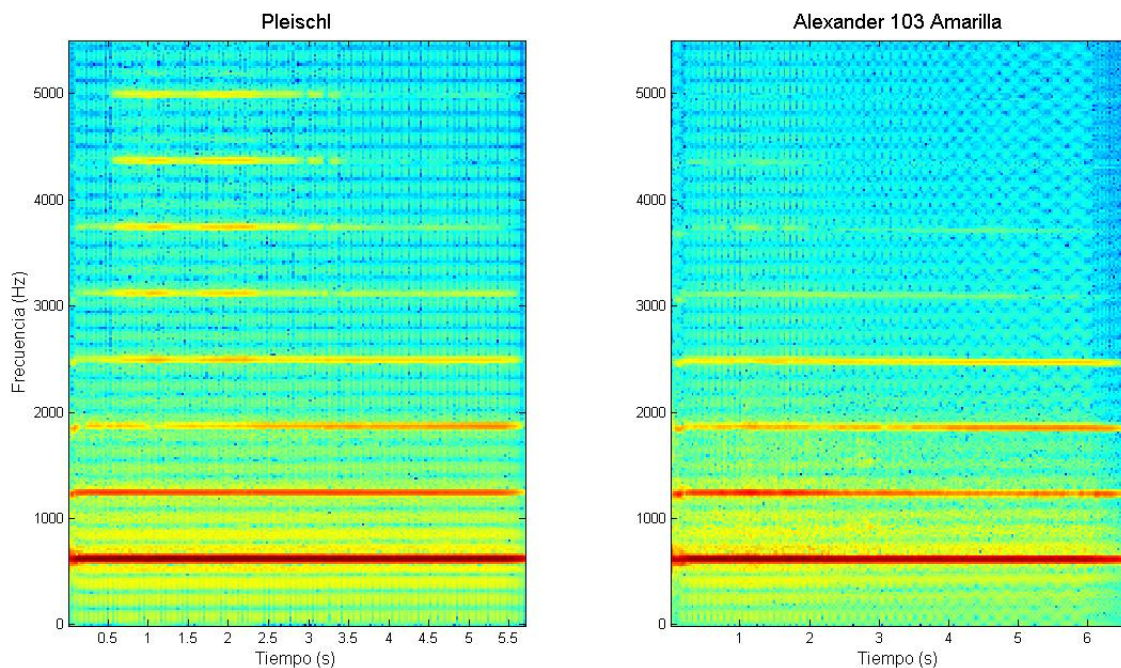


Figura 4.29: *Espectrogramas de las trompas Pleischl y Alexander 103 Amarilla para la nota Sib<sub>4</sub>.*

Para seguir con el estudio espectral de las señales acústicas del conjunto de trompas para la nota Sib<sub>4</sub>, se vuelve a analizar la matriz de amplitudes con el fin de obtener un listado de las trompas (Ver Tabla 10 en el Apéndice A) ordenadas según cómo esté distribuida la energía de la señal en:

- Los primeros ocho armónicos de la serie. La trompa con más energía en sus primeros ocho armónicos es la trompa *Alexander 103 Sin Lacar* y la que menos es la trompa *Alexander 103 Amarilla*.
- Los últimos ocho armónicos de la serie. La trompa con más energía en sus últimos ocho armónicos es la trompa *Alexander 103 Sin Lacar* y la que menos es la trompa *Yamaha 667D*.
- Los armónicos pares de la serie frente a los impares. La trompa, cuya energía está repartida en mayor medida en sus armónicos pares frente a sus armónicos impares, es la *Alexander 104* y la que menos es la trompa *Durk D03*.

- Los armónicos impares de la serie frente a los pares. Para la nota Do4 no hay ninguna señal en la que el nivel de energía repartida en los armónicos impares supere el nivel de energía en los pares.

A continuación, se va a analizar cómo está repartida la energía de una señal a lo largo de su serie armónica observando su espectro en frecuencia. En la figura 4.30 están representados los espectros en frecuencia de todas las trompas para la señal de audio correspondiente a la nota Sib4.

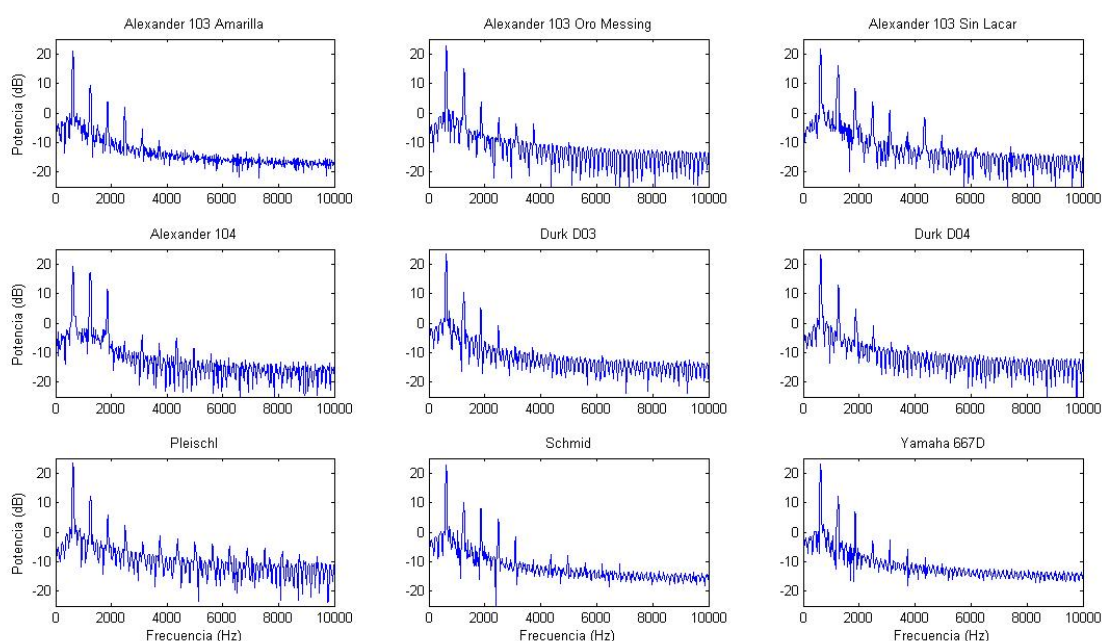


Figura 4.30: *Espectro de cada trompa para la nota Sib<sub>4</sub>.*

Comparando los espectros en frecuencia de la figura 4.30 se demuestran los resultados obtenidos tras el análisis de la matriz de amplitudes, realizado anteriormente.



## 4.5. Conclusiones del Análisis Espectral

En esta sección se sacarán las conclusiones del análisis espectral del timbre de las diferentes trompas, realizado en la sección anterior, de acuerdo con los conceptos tímbricos desde el punto de vista del oído experto de un trompista.

Para comenzar, se muestra una tabla resumen (Tabla 4.20) calculada a partir de los resultados obtenidos en la sección 4.4, donde se llevó a cabo el análisis espectral del timbre de las nueve trompas para cada nota (Fa3, Sol3, Do4, Re4, Mi4 y Sib4). De este análisis se obtuvieron los listados de las trompas para cada nota ordenadas de mayor a menor número de armónicos con energía significativa; de mayor a menor energía repartida en los ocho primeros armónicos del espectro armónico; de mayor a menor energía repartida en los ocho últimos armónicos; y de mayor a menor energía repartida en los armónicos pares frente a la energía en los impares. Haciendo un estudio estadístico de las posiciones ocupadas por cada modelo de trompa en cada uno de los listados, se han obtenido los resultados que se presentan en la tabla 4.20.

Tabla 4.20: Tabla resumen

ORDEN	Nº Armónicos	Primeros ocho Armónicos	Últimos ocho Armónicos	Armónicos Pares vs Impares
1	Alex. 103 OM	Alex.103 Am	Alex. 103 OM	Alex.104
2	Alex.103 SL	Alex.103 SL	Alex.103 SL	Alex.103 SL
3	Alex.103 Am	Durk D04	Alex.103 Am	Alex.103 Am
4	Durk D04	Yamaha 667D	Durk D04	Durk D04
5	Alex.104	Schmid	Alex.104	Alex. 103 OM
6	Yamaha 667D	Pleischl	Yamaha 667D	Schmid
7	Schmid	Alex.104	Schmid	Pleischl
8	Pleischl	Alex. 103 OM	Pleischl	Durk D03
9	Durk D03	Durk D03	Durk D03	Yamaha 667D

Para poder relacionar los resultados del análisis espectral del timbre de la trompa con las sensaciones tímbricas que percibe un trompista, hay que tener en cuenta una serie de conceptos acústicos desde el punto de vista musical:

- El número de armónicos con potencia significativa. Se puede decir que cuanto mayor sea el número de armónicos que aparecen en el espectro de un sonido, más brillante, claro o metálico será su timbre.
- Cómo esté repartida dicha potencia en su serie armónica. Dependiendo de qué armónico predomine en dicha serie el timbre del sonido será más profundo, redondo, cálido, o más nasal, áspero o disonante:
  - Los sonidos donde predominan los primeros ocho armónicos se caracterizan por un timbre más rico, más lleno, con más presencia.
  - Los últimos armónicos de la serie aportan carácter al sonido, haciendo el timbre más brillante, áspero y penetrante.
  - Los sonidos donde destacan los armónicos pares frente a los impares tienen un timbre abierto y luminoso.
  - Los sonidos donde destacan los armónicos impares frente a los pares tienen un timbre apagado, opaco, oscuro.

A partir de la tabla resumen 4.20 y de estos conceptos, se obtienen las siguientes conclusiones:

- La trompa con energía significativa en un mayor número de armónicos es la trompa *Alexander 103 Oro Messing*, por ello, se puede decir que es la trompa con un timbre más brillante, más claro y más metálico que el resto de trompas.
- La trompa con mayor energía repartida en sus ocho primeros armónicos es la trompa *Alexander 103 Amarilla*, por lo que se puede decir que es la trompa con un timbre más rico y lleno que el resto de trompas.
- En la tabla resumen se observa que los listados en cuanto a número de armónicos con energía significativa y en cuanto a energía en sus últimos ocho armónicos coinciden exactamente. Por lo que la trompa con mayor energía repartida en sus últimos ocho armónicos será también la trompa *Alexander 103 Oro Messing*, de esta forma se puede decir que es la

trompa con un timbre más penetrante, además de más brillante, claro y metálico frente al resto de trompas.

- La trompa con mayor diferencia energética entre sus armónicos pares y sus armónicos impares es la trompa *Alexander 104*, por lo tanto, se puede decir que es la trompa con un timbre más abierto y luminoso en relación con el resto de trompas.
- La trompa con menor diferencia energética entre sus armónicos pares y sus armónicos impares es la trompa *Yamaha 667D*, de hecho en algunas de las notas analizadas el nivel de energía de sus armónicos impares es superior al de sus armónicos pares. Por lo tanto, se puede decir que es la trompa con un timbre más opaco y apagado en relación con el resto de trompas.
- Haciendo un análisis global se puede decir que la trompa con menor número de armónicos significativos, menor nivel de energía repartida en sus primeros y últimos armónicos y la trompa con menor diferencia de energía entre sus armónicos pares e impares es la *Durk D03*, es decir, es la trompa con un nivel de energía en su serie armónica inferior al del resto de trompas. Por ello, se puede decir que es la trompa con un timbre más pobre, oscuro, más opaco y más apagado del conjunto de trompas estudiado.

A partir de las conclusiones obtenidas del estudio del timbre de la trompa a través del análisis espectral de su señal acústica, se pueden obtener las conclusiones finales de este proyecto, que se presentan en el capítulo siguiente.



## Conclusiones y líneas futuras

En este capítulo se presentan las conclusiones que se han obtenido tras la realización del estudio del timbre de la trompa a través del análisis espectral de su señal acústica.

El objetivo del proyecto era poder comparar trompas de diferentes marcas, modelos y materiales de fabricación en función del color de su timbre a partir de las características armónicas de su espectro sonoro; y tratar de comprobar si los resultados obtenidos coinciden con las sensaciones y opiniones de cualquier trompista experto.

En el capítulo anterior en el que se hacía el análisis espectral de la señal, se obtuvieron una serie de conclusiones en las que se comparaban las nueve trompas estudiadas y se clasificaban en función del color de su timbre:

- La trompa *Alexander 103 Oro Messing* es la trompa con el timbre más brillante y metálico.
- La trompa *Alexander 103 Amarilla* es la trompa con el timbre más lleno y más rico.
- La trompa *Alexander 104* es la trompa con el timbre más luminoso y abierto.
- La trompa *Yamaha 667D* es la trompa con el timbre más opaco y apagado.
- La trompa *Durk D03* es la trompa con el timbre más oscuro, opaco y apagado.

Desde el punto de vista de un trompista, se pueden confirmar estos resultados en líneas generales, pero teniendo en cuenta una serie de observaciones:

- Que estas valoraciones son muy subjetivas y dependen mucho de los conceptos de color de timbre que tenga el trompista, además de que los adjetivos empleados para ello suelen ser bastante abstractos.

- Que el timbre de un instrumento varía considerablemente dependiendo de quién lo ejecute, por lo que el timbre de una misma trompa tocada por dos trompistas puede variar increíblemente y, de este modo, haber opiniones totalmente diferentes.
- Que el timbre de un instrumento varía según la intensidad y tesitura que se toque. Por lo tanto, por ejemplo un sonido en el registro agudo tocado a una intensidad elevada puede sonar muy brillante y metálico, mientras que un sonido en el registro grave y a una intensidad media puede sonar oscuro, ambos tocados por una misma trompa.
- Que es difícil definir el timbre de una trompa con la ejecución de una nota independiente. Sería necesario interpretar un pasaje musical y estudiar el timbre en todo el conjunto. Por ello, es debido que algún resultado obtenido en este proyecto no se corresponde totalmente con la opinión de los trompistas. Por ejemplo, la trompa *Alexander 103 Oro Messing* siempre se ha considerado con timbre oscuro desde el punto de vista de un trompista, mientras que el análisis espectral revela que el timbre es todo lo contrario, brillante y metálico. Esto puede ser debido a que siempre un experto, al evaluar el timbre de un instrumento no sólo analiza una nota, si no un pasaje musical. E incluso dependiendo de qué pasaje se seleccione, el timbre puede variar considerablemente. No es lo mismo interpretar un fragmento de una obra clásica de W.A. Mozart, que un fragmento de una obra del romanticismo de R. Strauss.

Con todo esto se puede decir que se han cumplido los objetivos del proyecto, pero con una serie de limitaciones que en trabajos futuros se podrían subsanar:

## LÍNEAS FUTURAS

A continuación, se presentan una serie de posibles líneas futuras que podrían mejorar y ampliar el trabajo realizado en este proyecto:

- Como se ha comentado anteriormente, una manera de obtener resultados y conclusiones más fiables del análisis espectral del timbre de la trompa, es decir, que estén más cercanos a los conceptos de timbre para el oído de un trompista experto, sería mediante el análisis de pasajes musicales en lugar de tan solo con notas independientemente ejecutadas. De esta forma, además de mejorar los resultados en relación al timbre, también se podrían analizar otra serie de parámetros relacionados por ejemplo con la articulación, es decir, se

podría comparar entre trompas en función de la facilidad de ataque, facilidad del legato, flexibilidad en los intervalos...

- Dado las dificultades para disponer de un número tan elevado de trompas para realizar la grabación, la toma de los datos se tuvo que realizar en una cabina de estudio del Real Conservatorio de Música de Madrid. Para un próximo estudio sería conveniente realizar las grabaciones en una cámara anecoica equipada con los equipos técnicos especiales para ello.
- Otra línea futura podría ser el estudio en profundidad de los materiales de fabricación y cómo influyen directamente en el timbre de la trompa.
- También se podría analizar cómo influye el tipo de boquilla y de campana (material, forma, tamaño...) en el timbre de la trompa, así como la posición a la hora de tocar.
- Una línea futura interesante podría ser el estudio del timbre de la trompa con diferentes intérpretes. Es decir, en lugar de varias trompas ejecutadas por una misma persona, varios trompistas tocando la misma trompa, con el fin de analizar cómo influye la persona que toca un instrumento en el timbre del sonido resultante.
- Un clasificador de tipos de trompa a partir del timbre de su sonido sería un estudio muy interesante y útil. Una ampliación de dicho estudio podría ser la diferenciación de varios instrumentos, de viento-madera, viento-metal, cuerda... a partir de su análisis espectral.



# Capítulo 6

## Presupuesto

Para este último capítulo se realizará el presupuesto para conocer el coste económico del proyecto. En él se detallará la inversión de tiempo para cada una de las tareas realizadas, el gasto material y el gasto personal involucrado para, finalmente, calcular el coste total.

En la tabla 6.1 se muestran las fases del proyecto y el tiempo aproximado invertido en cada una.

Tabla 6.1: Tiempo empleado en la realización de cada tarea y el tiempo total.

TAREA	TIEMPO EMPLEADO
1. Definición de los objetivos y organización del proyecto	10 h
2. Estudio de la documentación	150 h
3. Instalación del software necesario	10 h
4. Creación de programas	50 h
5. Experimentación	40 h
6. Análisis y evaluación de resultados	120 h
7. Redacción de la memoria	280 h
<b>TOTAL</b>	<b>660 h</b>

Tomando como referencia el informe del Colegio Oficial de Ingenieros Técnicos de Telecomunicaciones (COITT) “Baremos de Honorarios Orientativos para Trabajos Profesionales”, los costes para “Trabajos por tiempo empleado” son 60 €/hora para la proyectando y para la directora del proyecto 78 €/hora. Los costes por un músico profesional son 70 €/hora (Ver tabla 6.2).

Tabla 6.2: Costes Personales

NOMBRE	CATEGORÍA	TIEMPO EMPLEADO	PRECIO/HORA	COSTE
Gloria Hijosa Martín	Ingeniero Técnico	660 h	60 €/ h	39600 €
Ascensión Gallardo Antolín	Directora Proyecto	66 h	78 €/ h	5148 €
Gloria Hijosa Martín	Músico	10 h	70 €/ h	700 €
			<b>TOTAL</b>	<b>45448 €</b>

Los costes materiales comprenden todos aquellos aspectos que están relacionados con la compra de equipos, licencias, etc. En la tabla 6.3 se detallan los costes de los equipos empleados, los costes de las licencias empleadas, así como los costes de alquiler de la sala de grabación y del micrófono utilizado para ello.

Tabla 6.3: Costes Materiales

MATERIAL	PRECIO	COSTE
Alquiler sala del Real Conservatorio Superior de Madrid	50 €/ día	50 €
Alquiler trompas ( 9 trompas, 1 h cada trompa)	9 x 50 €/ h	450 €
Alquiler micrófono	30 €/ día	30 €
Ordenador portátil	700 €	700 €
Software necesario	60 €	60 €
Matlab (licencia para uso personal)	320 €	320 €
Material de oficina y no tangible	250 €	250 €
	<b>TOTAL</b>	<b>1860 €</b>

Así, de este modo, el coste total del proyecto se muestra en la tabla 6.4 y asciende a un valor de CINCUENTA Y SIETE MIL DOSCIENTOS CUARENTA Y DOS EUROS CON SESENTA Y OCHO CÉNTIMOS (57242,68 €).

Tabla 6.4: Coste Total

CONCEPTO	COSTE
Gastos Personales	45448 €
Gastos Materiales	1860 €
Base Imponible	47308 €
I.V.A. (21 %)	9934,68 €
<b>TOTAL</b>	<b>57242,68 €</b>





# APÉNDICES



Tabla 5: Listas de trompas para la nota Fa3 ordenadas en función de cómo esté repartida la potencia en su serie armónica en cuanto: n<sup>o</sup> de armónicos, primeros ocho armónicos, últimos ocho armónicos, armónicos pares frente a armónicos impares y viceversa

ORDEN	Nº Armónicos	Primeros ocho Armónicos	Últimos ocho Armónicos	Armónicos Pares vs Impares	Armónicos Impares vs Pares
1	Durk D04	Alex.103 Am	Durk D04	Durk D04	Yamaha 667D
2	Alex.103 SL	Alex.103 SL	Alex.104	Alex.103 Am	Schmid
3	Alex.104	Alex.104	Alex.103 SL	Alex.103 SL	Alex.104
4	Pleischl	Alex. 103 OM	Alex.103 Am	Alex. 103 OM	
5	Alex.103 Am	Durk D04	Pleischl	Durk D03	
6	Alex. 103 OM	Yamaha 667D	Schmid	Pleischl	
7	Schmid	Schmid	Alex. 103 OM		
8	Yamaha 667D	Durk D03	Durk D03		
9	Durk D03	Pleischl	Yamaha 667D		

Tabla 6: Listas de trompas para la nota Sol3 ordenadas en función de cómo esté repartida la potencia en su serie armónica en cuanto: n<sup>o</sup> de armónicos, primeros ocho armónicos, últimos ocho armónicos, armónicos pares frente a armónicos impares y viceversa

ORDEN	Nº Armónicos	Primeros ocho Armónicos	Últimos ocho Armónicos	Armónicos Pares vs Impares	Armónicos Impares vs Pares
1	Alex. 103 OM	Alex.103 Am	Yamaha 667D	Alex.104	Alex.103 Am
2	Alex.103 Am	Schmid	Alex.103 SL	Pleischl	
3	Yamaha 667D	Pleischl	Alex. 103 OM	Schmid	
4	Durk D03	Alex.104	Alex.104	Durk D04	
5	Alex.103 SL	Durk D03	Alex.103 Am	Alex.103 SL	
6	Pleischl	Durk D04	Durk D03	Yamaha 667D	
7	Durk D04	Yamaha 667D	Durk D04	Alex. 103 OM	
8	Alex.104	Alex. 103 OM	Schmid	Durk D03	
9	Schmid	Alex.103 SL	Pleischl		

Tabla 7: Listas de trompas para la nota Do4 ordenadas en función de cómo esté repartida la potencia en su serie armónica en cuanto: n<sup>o</sup> de armónicos, primeros ocho armónicos, últimos ocho armónicos, armónicos pares frente a armónicos impares

<b>ORDEN</b>	<b>Nº Armónicos</b>	<b>Primeros ocho Armónicos</b>	<b>Últimos ocho Armónicos</b>	<b>Armónicos Pares vs Impares</b>
<b>1</b>	Alex. 103 OM	Yamaha 667D	Alex. 103 OM	Alex.103 SL
<b>2</b>	Alex.103 Am	Alex.103 SL	Alex.103 Am	Durk D03
<b>3</b>	Alex.104	Alex.103 Am	Schmid	Durk D04
<b>4</b>	Schmid	Durk D04	Yamaha 667D	Alex.104
<b>5</b>	Yamaha 667D	Alex. 103 OM	Alex.104	Alex. 103 OM
<b>6</b>	Alex.103 SL	Alex.104	Alex.103 SL	Alex.103 Am
<b>7</b>	Durk D04	Pleischl	Durk D04	Schmid
<b>8</b>	Pleischl	Schmid	Pleischl	Yamaha 667D
<b>9</b>	Durk D03	Durk D03	Durk D03	Pleischl

Tabla 8: Listas de trompas para la nota Re4 ordenadas en función de cómo esté repartida la potencia en su serie armónica en cuanto: n<sup>o</sup> de armónicos, primeros ocho armónicos, últimos ocho armónicos, armónicos pares frente a armónicos impares y viceversa

<b>ORDEN</b>	<b>Nº Armónicos</b>	<b>Primeros ocho Armónicos</b>	<b>Últimos ocho Armónicos</b>	<b>Armónicos Pares vs Impares</b>	<b>Armónicos Impares vs Pares</b>
<b>1</b>	Alex.103 SL	Durk D04	Alex.104	Alex.103 Am	Alex.104
<b>2</b>	Alex.104	Alex.103 Am	Schmid	Yamaha 667D	
<b>3</b>	Yamaha 667D	Durk D03	Alex.103 SL	Durk D04	
<b>4</b>	Schmid	Alex.103 SL	Durk D04	Durk D03	
<b>5</b>	Durk D04	Schmid	Alex. 103 OM	Alex. 103 OM	
<b>6</b>	Pleischl	Alex.104	Yamaha 667D	Pleischl	
<b>7</b>	Alex. 103 OM	Alex. 103 OM	Pleischl	Schmid	
<b>8</b>	Alex.103 Am	Yamaha 667D	Durk D03	Alex.103 SL	
<b>9</b>	Durk D03	Pleischl	Alex.103 Am		

Tabla 9: Listas de trompas para la nota Mi4 ordenadas en función de cómo esté repartida la potencia en su serie armónica en cuanto: n<sup>o</sup> de armónicos, primeros ocho armónicos, últimos ocho armónicos, armónicos pares frente a armónicos impares

<b>ORDEN</b>	<b>Nº Armónicos</b>	<b>Primeros ocho Armónicos</b>	<b>Últimos ocho Armónicos</b>	<b>Armónicos Pares vs Impares</b>
<b>1</b>	Alex.103 Am	Pleischl	Alex.103 Am	Alex.104
<b>2</b>	Alex. 103 OM	Yamaha 667D	Alex. 103 OM	Alex.103 Am
<b>3</b>	Yamaha 667D	Schmid	Durk D04	Alex.103 SL
<b>4</b>	Durk D04	Alex.103 Am	Schmid	Alex. 103 OM
<b>5</b>	Schmid	Durk D03	Pleischl	Pleischl
<b>6</b>	Durk D03	Alex. 103 OM	Yamaha 667D	Durk D03
<b>7</b>	Alex.104	Alex.103 SL	Alex.104	Schmid
<b>8</b>	Pleischl	Durk D04	Durk D03	Yamaha 667D
<b>9</b>	Alex.103 SL	Alex.104	Alex.103 SL	Durk D04

Tabla 10: Listas de trompas para la nota Sib4 ordenadas en función de cómo esté repartida la potencia en su serie armónica en cuanto: n<sup>o</sup> de armónicos, primeros ocho armónicos, últimos ocho armónicos, armónicos pares frente a armónicos impares

<b>ORDEN</b>	<b>Nº Armónicos</b>	<b>Primeros ocho Armónicos</b>	<b>Últimos ocho Armónicos</b>	<b>Armónicos Pares vs Impares</b>
<b>1</b>	Pleischl	Alex.103 SL	Alex.103 SL	Alex.104
<b>2</b>	Alex.103 SL	Durk D04	Pleischl	Alex.103 SL
<b>3</b>	Durk D03	Pleischl	Schmid	Schmid
<b>4</b>	Durk D04	Durk D03	Alex.103 Am	Alex. 103 OM
<b>5</b>	Yamaha 667D	Yamaha 667D	Durk D04	Alex.103 Am
<b>6</b>	Schmid	Alex. 103 OM	Alex.104	Durk D04
<b>7</b>	Alex. 103 OM	Schmid	Durk D03	Pleischl
<b>8</b>	Alex.104	Alex.104	Alex. 103 OM	Yamaha 667D
<b>9</b>	Alex.103 Am	Alex.103 Am	Yamaha 667D	Durk D03



# Bibliografía

- [1] Bruscianelli, Calogero. <http://www.labc.usb.ve>. *Electroacústica*
- [2] Caclin, A., McAdams, S., Smith, B., Winsberg, S. (2005). *Acoustic correlates of timbre space dimensions: A confirmatory study using synthetic tones*. J. Acoust. Soc. Am. 118.
- [3] Calvo-Manzano, Antonio. *Acústica físico-musical*. Real Musical Editores, 1991.
- [4] Camacho, A., and Harris, J. (2008). *A sawtooth waveform inspired pitch estimator for speech and music*. J. Acoust. Soc. Am. 124.
- [5] Cristi, Roberto. *Applied Digital Signal Processing*. NPS, Electrical and Computer Engineering. Monterey, California.
- [6] Farkas, Philip. *El Arte de Tocar la Trompa*.
- [7] Fernández de la Gándara, Gonzalo; Lorente, Miguel. *Acústica Musical*. Ediciones del ICCMU, 1998. Música Hispana Textos. Manuales.
- [8] Krimphoff, J., McAdams, S., and Winsberg, S. (1994). *Caractérisation du timbre des sons complexes. II. Analyses acoustiques et quantification psychophysique (Characterization of the timbre of complex sounds. II Acoustical analysis and psychophysical quantification)*. J. Phys. 4.
- [9] McAulay, R., and Quatieri, T. (1986). *Speech analysis/synthesis based on a sinusoidal representation*. IEEE Trans. Acoust. Speech Signal Process. 34(4).
- [10] Merino de la Fuente, Jesús Mariano. *Las vibraciones de la música*. Editorial Club Universitario, 2006.

- 
- [11] Misdariis, N., Smith, B., Pressnitzer, D., Susini, P., and McAdams, S. (1998). *Validation of a multidimensional distance model for perceptual dissimilarities among musical timbres*. J. Acoust. Soc. Am. 103.
- [12] Oppenheim, Alan V., Schafer, Ronald W., John R. Buck. *Tratamiento de Señales en Tiempo Discreto*, Prentice Hall, 2ª edición, 2000.
- [13] Peeters, G., Giordano, B., Susini, P., Misdariis, N., McAdams, S. *The Timbre Toolbox: Extracting audio descriptors from musical signals*
- [14] Pollard, H., and Jansson, E. (1982). *A tristimulus method for the specification of musical timbre*. Acustica 51.
- [15] Salvat Editores, 2002. *Los Instrumentos Musicales, La Trompa*.
- [16] Serra, X., and Smith III, J. (1990). *Spectral modeling synthesis: A sound analysis/synthesis system based on a deterministic plus stochastic decomposition*. Comput. Music J. 14.